Revista Brasileira de

ASTRONOMIA

Produzida pela Sociedade Astronômica Brasileira

Ano 1 | Número 4

A busca por NOVOS MUNDOS

A Astronomia no século XXI

Uma galáxia com órbitas ressonantes

A Missão Geodésica e a forma da Terra

Editorial

Esta quarta edição da Revista Brasileira de Astronomia celebra a busca por novos mundos. É apropriado falar sobre o assunto quando acabamos de receber a notícia de que Michel Mayor e Didier Queloz, os descobridores do primeiro exoplaneta orbitando uma estrela "normal", receberam o Prêmio Nobel de Física de 2019. O prêmio foi oferecido também ao cosmólogo James Peebles por suas importantes contribuições ao campo da Cosmologia Observacional. É o reconhecimento do desenvolvimento tecnológico e teórico da Astrofísica das últimas décadas.

O prêmio serve de contraponto ao crescimento recente de teorias conspiratórias e negacionistas como a defesa de que a Terra seria plana. Em tempos de pós-verdade, é fundamental comemorar o avanço da ciência e do conhecimento humano, e resistir bravamente à promoção da ignorância como meta. Devemos sempre lutar pelo uso e reconhecimento das evidências — e não de ideologias — como base para o estabelecimento de políticas públicas.

Nesse contexto, a RBA vem cumprir o papel essencial de mostrar ao público a ciência de ponta desenvolvida no país. Apresentamos aqui astrônomos brasileiros que trabalham com dinâmica galáctica, exoplanetas e aprendizado de máquina para a pesquisa em Astrofísica. Precisamos lembrar: não há desenvolvimento sem ciência, e não há ciência sem o apoio popular. Sem a ciência, só nos resta o obscurantismo.

Thiago Signorini Gonçalves
Coordenador de Imprensa
da Sociedade Astronômica Brasileira

Esquerda
Detalhe da Nebulosa Cabeça da Bruxa, nome popular de IC 2118 (Crédito: DSS/Utkarsh Mishra).
Capa
Representação artística de um exoplaneta (Crédito: Pixabay).
Contra-Capa
Observatório de Haute-Provence, onde foram feitas as observações que levaram à descoberta do planeta de 51 Pegasi por Michel Mayor e Didier Queloz (Crédito: Acervo pessoal de José Dias do Nascimento).

Revista Brasileira de Astronomia

produzida pela
Sociedade Astronômica Brasileira

Conselho Editorial Alan Alves Brito, Reinaldo Ramos de Carvalho, Lucimara Martins, Ramachrisna Teixeira, Thiago Signorini Gonçalves
Editor Helio J. Rocha-Pinto
Equipe de colaboradores Hélio Dotto Perottoni, Mylena Larrubia, Matheus Bernini Peron, Douglas Brambila dos Santos, Maria Luiza Ubaldo de Melo

Contato secsab@sab-astro.org.br
Para anunciar Fale com Rosana no email acima ou ligue (11) 3091-8684, Seg. a Sex. 10 às 16 h.
Para submissões
Contacte um membro do conselho editorial

Presidente
Reinaldo Ramos de Carvalho
Vice-Presidente
Helio J. Rocha-Pinto
Secretário-Geral
Ramachrisna Teixeira
Secretário
Alan Alves Brito
Tesoureira
Lucimara Martins
Endereço
Sociedade Astronômica Brasileira
Rua do Matão, 1226
05508-090 São Paulo – SP
http://www.sab-astro.org.br

4 **A Missão Geodésica do século XVIII**
Sandro Rembold narra a apaixonante aventura dos cientistas que se dedicaram a medir a forma da Terra.

12 **Astronomia do Futuro**
Reinaldo Rosa expõe o provável cenário de intensa computação que o século XXI reserva para a Astronomia.

22 **Ressonâncias na galáxia NGC 7020**
As ressonâncias criam fascinantes padrões orbitais, como explica Horácio Dottori.

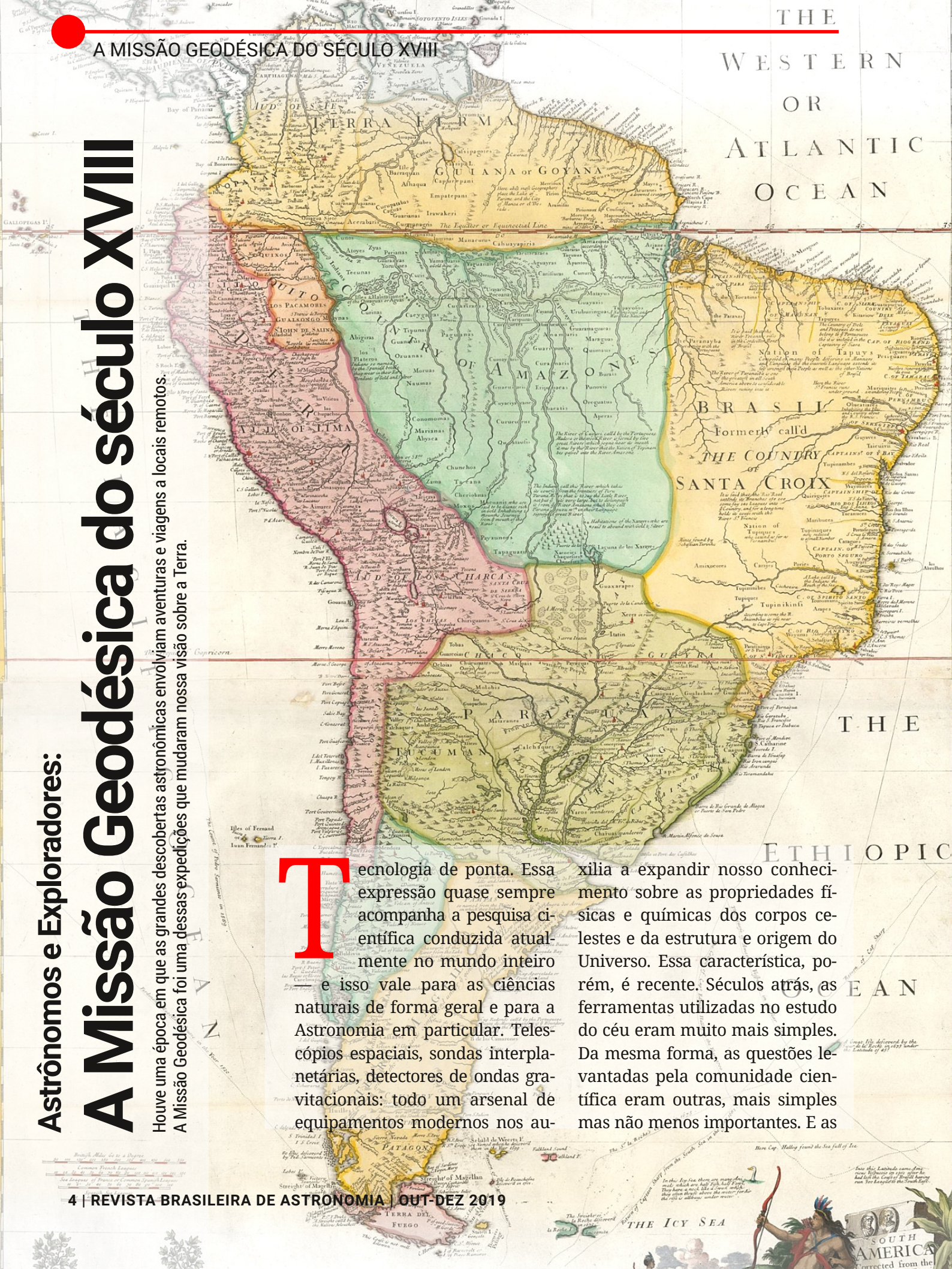
28 **50 anos do Projeto LION**
A história de como astrônomos brasileiros colaboraram com a missão Apollo é contada por Nelson Travnik.

32 **A busca por novos mundos**
José Dias do Nascimento traça um interessante histórico acerca das especulações e da busca por outros mundos.

A Missão Geodésica do século XVIII

Astrônomos e Exploradores:

Houve uma época em que as grandes descobertas astronômicas envolviam aventuras e viagens a locais remotos. A Missão Geodésica foi uma dessas expedições que mudaram nossa visão sobre a Terra.



Tecnologia de ponta. Essa expressão quase sempre acompanha a pesquisa científica conduzida atualmente no mundo inteiro — e isso vale para as ciências naturais de forma geral e para a Astronomia em particular. Telescópios espaciais, sondas interplanetárias, detectores de ondas gravitacionais: todo um arsenal de equipamentos modernos nos auxilia a expandir nosso conhecimento sobre as propriedades físicas e químicas dos corpos celestes e da estrutura e origem do Universo. Essa característica, porém, é recente. Séculos atrás, as ferramentas utilizadas no estudo do céu eram muito mais simples. Da mesma forma, as questões levantadas pela comunidade científica eram outras, mais simples mas não menos importantes. E as

respostas a essas questões com frequência não se utilizavam de muito mais do que telescópios leves e portáteis, utilizando lentes com a qualidade ótica então disponível.

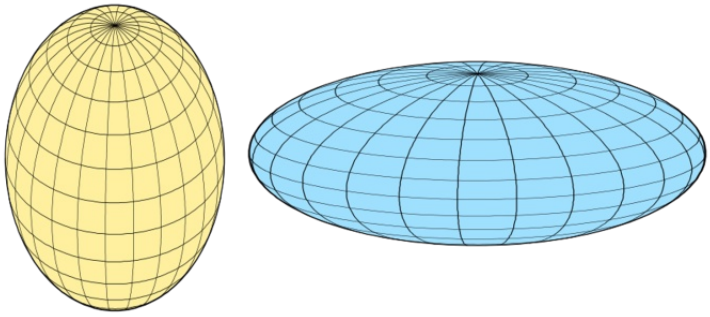
No começo do século XVIII, os astrônomos dispunham de equipamentos mecânicos para medir posições aparentes dos astros, e telescópios leves para uso astronômico eram comuns. Havia, ainda, uma mecânica celeste relativamente avançada — regida pelas chamadas Leis de Kepler do movimento planetário.

A astronomia era muito valorizada como ciência, em especial devido às aplicações na navegação e localização geográfica. Para tais fins, a latitude de um observador pode ser obtida diretamente a partir da medida da altura máxima no céu atingida por uma estrela qualquer cuja localização seja conhecida. A longitude é muito mais difícil de obter; uma forma possível consiste em determinar o horário local de ocorrência de um dado evento astronômico (como um eclipse) e comparar com o horário de ocorrência desse evento na localidade de Greenwich, na Inglaterra — usada até hoje como ponto de referência para medição de longitudes. Dessa forma, obter coordenadas exatas em Terra qualquer usando apenas observações astronômicas era factível na época, havendo equipamentos adequados e boas condições de observação. A melhoria tanto no mapeamento geográfico quanto nas estimativas de localização em alto-mar resultantes do desenvolvimento dessas técnicas atraíam um grande interesse governamental e, consequentemente, recursos.

Mas, além do potencial econômico associado à navegação e à cartografia, a astronomia seria usada também para resolver uma questão bem mais desafiadora. Em seu livro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Isaac Newton havia proposto a existência de uma "força à distância" responsável pelos fenômenos gravitacionais em todas as escalas, incluindo os movimentos planetários — a força gravitacional. Sua teoria atribuía tais movimentos a uma combinação de conservação da energia mecânica (garantindo um movimento continuado dos planetas e da Lua) com a atuação da força gravitacional entre estes.
O conceito de uma força à distância, no entanto, era algo inovador e gerava grande desconforto em parte dos filósofos da época. De fato, ainda antes da introdução do conceito de força gravitacional por Newton, o filósofo René Descartes em seu *Principia Philosophiae* havia proposto um modelo distinto para explicar os movimentos planetários, introduzindo o conceito de vórtices (redemoinhos) em um meio hipotético que permearia o Universo, chamado *éter*. Esses vórtices forçariam os movimentos circulares por arras-

Na página anterior
Mapa da América do Sul, publicado em Londres, em 1710, gravado por John Senex e dedicado a seu amigo, e astrônomo, Edmund Halley.

to. Um desses vórtices estaria centrado na Terra, forçando o movimento da Lua em torno desta. A comunidade científica europeia de fato se dividiu entre os defensores do modelo Cartesiano para o Universo e os defensores da gravitação newtoniana.



Acima
Um esferoide alongado (em amarelo) ou achatado (em azul) nos polos: o formato da Terra para Descartes e Newton, fora de escala.

Para se testar a validade de dois modelos físicos distintos e concorrentes, é preciso que ambos façam previsões distintas entre si para, pelo menos, um fenômeno natural. E, no caso dos modelos de Descartes e da gravitação newtoniana, a discrepância estaria no próprio formato do nosso planeta. Os vórtices de Descartes impunham um alongamento da Terra na direção do seu eixo de rotação — ou seja, a Terra não seria esférica, mas sim alongada na direção dos polos. Na gravitação newtoniana, por outro lado, a rotação da Terra induziria a uma redução na aceleração gravitacional efetiva próximo ao equador; assim, a Terra seria achatada na direção dos pólos, em contraste com a previsão do modelo cartesiano. Dessa forma, o embate entre essas duas teorias seria resolvido pela estimativa precisa da forma da Terra.

Mas como determinar o formato da Terra em uma época em que a astronáutica e o uso de telescópios espaciais eram, ainda, inexistentes? Embora possa parecer surpreendente, o fato é que diferentes geometrias para a Terra impõem uma assinatura sutil nas observações do céu. Considere que a Terra é bastante achatada nos polos, e que você parte do polo norte, caminhando, em direção ao equador. A superfície na qual você caminha é quase plana, devido ao achatamento da Terra. Vai ser preciso caminhar muito para que você perceba alguma alteração significativa na direção vertical, ou seja, nas estrelas que estão imediatamente acima de você, no céu. Em contraste, quando estiver se aproximando da linha do equador, um curto percurso caminhado já resulta em uma grande alteração na direção vertical, já que a curvatura abaixo dos seus pés é alta. Assim, a assinatura observacional de uma Terra achatada nos polos é constatável desta forma: próximo dos polos, é preciso se deslocar mais do que próximo ao equador para uma mesma variação na configuração das estrelas observadas no topo do céu. Se a Terra for alongada nos polos, a assinatura será exatamente o oposto: o deslocamento necessário é maior no equador do que nos polos. Um cientista interessado em

Acima
Louis Godin, primeiro à esquerda, foi o idealizador da Missão Geodésica, na qual foi acompanhado por Bouger (no meio) e Condamine (à direita).

realizar tais medidas deveria, preferencialmente, deslocar-se para regiões extremas — o mais próximo possível tanto do equador quanto de um dos polos geográficos. Em cada locação, deveria definir um percurso na direção norte–sul que se estendesse por vários quilômetros em latitude, e comparar a movimentação aparente do céu entre os dois extremos desse percurso. Essa movimentação aparente celeste poderia ser medida através da diferença nas alturas máximas de uma mesma estrela entre as duas latitudes. Finalmente, restaria medir a distância em Terra entre os dois pontos extremos de observação.

Tudo isso estava na cabeça do astrônomo francês Louis Godin quando, em dezembro de 1733, propôs à Academia de Ciências Francesa uma expedição à América do Sul visando estimar o raio de curvatura terrestre naquela região. A Academia aprovou a expedição e se dedicou a angariar fundos para financiá-la. Conseguir tais recursos não foi difícil, uma vez que a expedição também faria medições das latitudes e longitudes locais nas regiões a serem exploradas, gerando melhorias nos mapas de navegação. O planejamento da expedição foi realizado ao longo de 1734 e se converteu em um par de expedições: uma missão secundária, franco-sueca, até a fronteira entre a Finlândia e a Suécia, chamada *missão polar*, e uma missão principal para a América do Sul, na região da então Audiência de Quito, o atual Equador — a chamada *Missão Geodésica*. Uma vez que a Audiência de Quito era território espanhol, a Missão Geodésica se converteu em uma missão conjunta franco-espanhola. A equipe da Missão Geodésica foi composta pelos astrônomos Louis Godin e Pierre Bouguer, o geógrafo e matemático Charles Marie de La Condamine, além de instrumentadores e geógrafos franceses e espanhóis, carregando uma carga considerável em telescópios e outros ins-

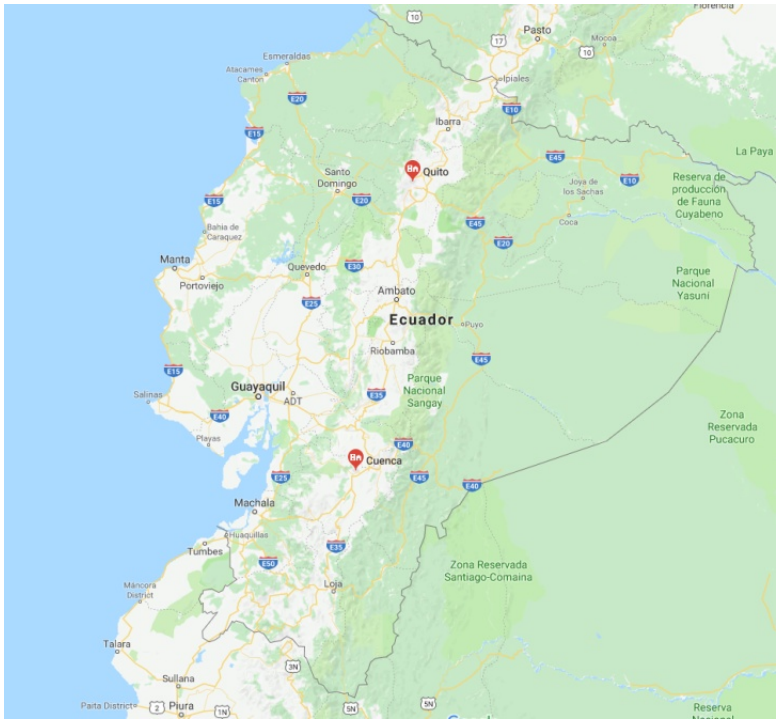
trumentos. A duração da expedição foi estimada em um ano mais o intervalo de vários meses de deslocamento de ida e volta da América do Sul até a França. A região escolhida para a realização das medidas foi um par de cadeias de montanhas que fazem parte da cordilheira dos Andes, tendo um amplo vale entre ambas, que se estendia entre as cidades de Quito ao norte e Cuenca ao sul.

Embora a ideia por trás do experimento é simples — deslocar-se em linha reta na linha norte–sul e medir tanto a movimentação aparente sofrida pela esfera celeste quanto a extensão do próprio deslocamento em Terra — sua execução é formidável. Em uma região crivada de montanhas e recoberta por florestas, é impossível deslocar-se e medir o trajeto deslocado metro a metro. A técnica utilizada pelos membros da missão foi o da triangulação: as distâncias entre os dois pontos extremos de observação do céu foram calculadas através das localizações relativas de cerca de 30 montanhas e vulcões. Os dois extremos dessa cadeia — Quito e Cuenca — estavam a quase 400 quilômetros entre si, uma distância suficiente para se estimar com segurança o movimento relativo das estrelas no céu entre essas duas latitudes, mas tornava o processo de triangulação demorado e cansativo.

A expedição partiu da Europa em maio de 1735. Seguiu-se uma longa viagem marítima da Espanha até a ilha de Martinica, e depois aos portos de Santo Domingo (na República Dominicana) e Cartagena de Índias (na Colômbia), chegando finalmente ao Panamá. Transportados por mulas, os membros da expedição e seus equipamentos cruzaram o Panamá para, já às margens do Oceano Pacífico, realizarem o último trecho marítimo até Guayaquil, no Equador. Um último trecho no lombo de mulas os conduziu à cidade de Quito, onde chegaram em junho de 1736 — mais de um ano após a partida na França.

O complexo trabalho de medição seria realizado em duas etapas: a primeira, mais demorada e exaustiva, consistia em medir as posições relativas das diversas montanhas da cadeia que sepa-

Abaixo
Mapa moderno do Equador, mostrando a localização das cidades de Quito e Cuenca (Crédito: Google Maps).

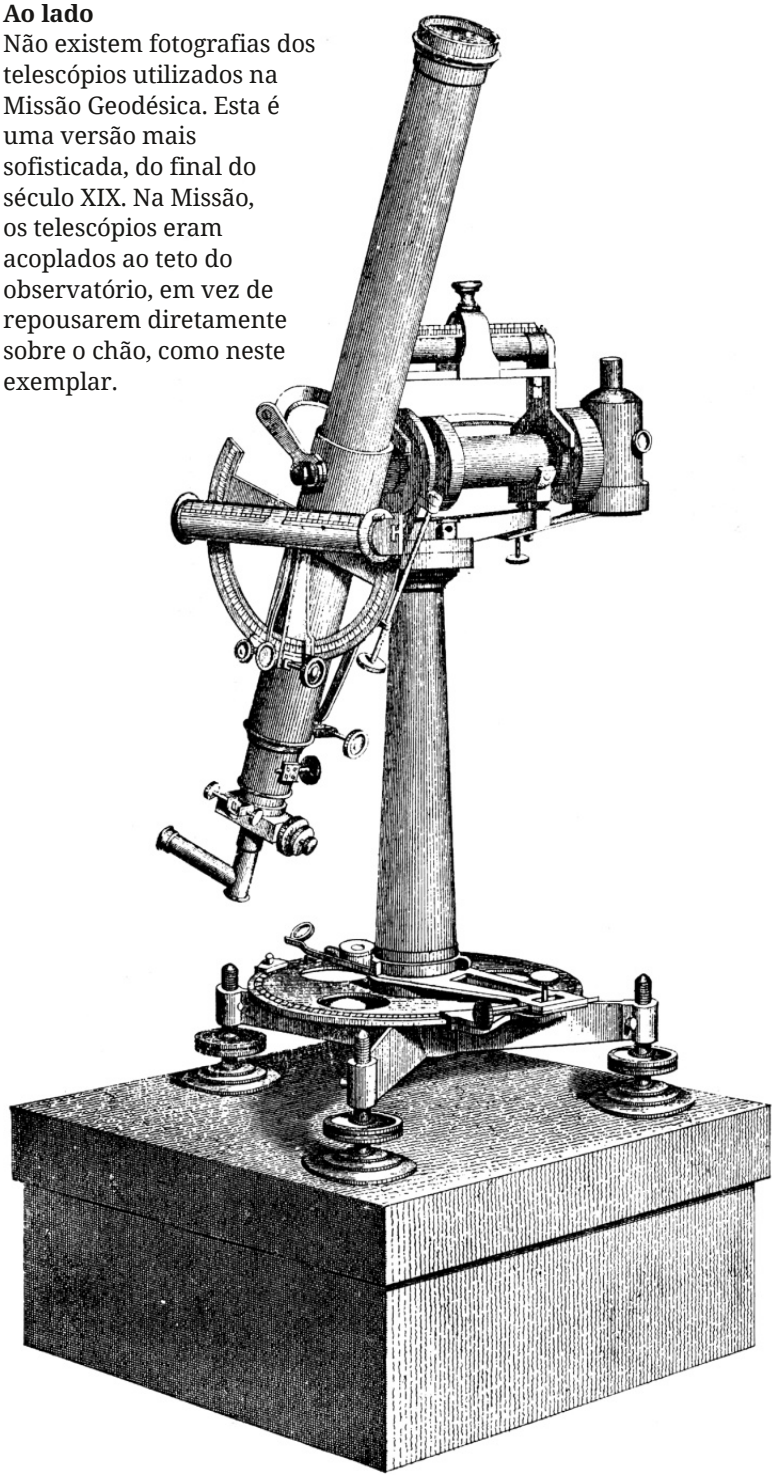


Acima
Um pequeno trecho da região explorada pela Missão Geodésica, mostrando algumas das montanhas que foram usadas para a triangulação da distância entre Quito e Cuenca.

ram Quito de Cuenca. Para medir as posições relativas das montanhas, os membros da equipe instalavam bandeiras, fogueiras ou quaisquer outros elementos de destaque, e mediam a direção em que esse elemento deveria ser observado a partir de outras montanhas. A equipe acreditava que, na ausência de contratempos, esse trabalho estaria completo em apenas alguns meses — mas os contratempos, particularmente em uma missão tão complexa e audaciosa como esta, logo começaram a aparecer. Além de expostos a diversas doenças tropicais, como a malária, seus gastos financeiros se mostraram muito superiores aos estimados no início da Missão, de forma que os fundos se esgotaram rapidamente, obrigando os astrônomos a investirem seus próprios recursos. Grande parte do trabalho era executado nas montanhas, durante vários dias consecutivos; além do frio extremo, as alturas extremas dos picos escolhidos submeteram os membros da equipe à baixa oxigenação sanguínea, um fenômeno que até então desconheciam. Letárgicos, estavam ainda sujeitos às frequentes chuvas e neblina que encobriam as montanhas e atrasavam a realização das observações, além da destruição realizada pelos fortes ventos e pelos animais selvagens sobre os pontos de fumaça utilizados como marcadores das posições de referência ideais nas diferentes montanhas. Todos esses problemas produziram um enorme atraso no cronograma original: as medidas somente foram concluídas em 1739, quatro anos após o começo da expedição.

Finda essa etapa, bastava determinar as latitudes relativas dos dois extremos da linha — Quito e Cuenca. Então, novos problemas passaram a assombrar a equipe. No mesmo ano, se inicia a Guer-

ra do Asiento entre a Grã-Bretanha e a Espanha, o que obrigou os membros espanhóis a se au-



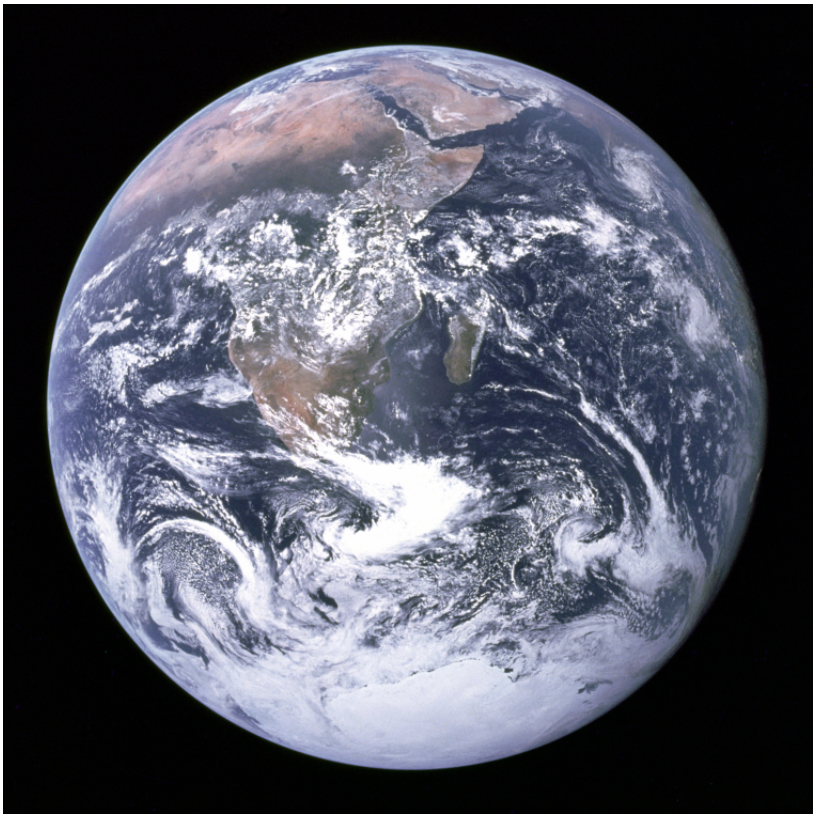
Ao lado
Não existem fotografias dos telescópios utilizados na Missão Geodésica. Esta é uma versão mais sofisticada, do final do século XIX. Na Missão, os telescópios eram acoplados ao teto do observatório, em vez de repousarem diretamente sobre o chão, como neste exemplar.

sentarem várias vezes da Missão. Desfalcados, os membros restantes se dedicaram a colocar os equipamentos astronômicos novamente em boas condições de uso, uma vez que os equipamentos e telescópios, após serem transportados múltiplas vezes por várias cententas de quilômetros e passarem por várias montagens e desmontagens, em condições variáveis de umidade e temperatura, estavam severamente danificados. Em cada extremo da linha de medida foi construído um observatório simplificado, nos quais os telescópios foram instalados e acoplados ao teto. Para a realização das observações, o sistema ótico deveria ser alinhado com precisão na direção norte–sul; porém, os prédios sofriam pela expansão e contração devido às variações de umidade e temperatura, além de serem abalados pelos frequentes terremotos da região. Finalmente, medidas de latitude devem ser repetidas várias vezes e são sempre sujeitas a diversas complicações de natureza observacional — incluindo o céu encoberto por nuvens. Finalmente, no início do ano de 1743 — após mais de três anos de observações astronômicas e impressionantes quase oito anos após o início da missão — os membros da equipe finalmente concluíram as observações que permitiriam determinar o formato da Terra.

As complexas medições realizadas pela Missão Geodésica, quan-

do comparadas com as equivalentes obtidas pela Missão Polar no norte da Europa, mostraram inequivocamente que a Terra é um esferoide oblato — ou seja, é levemente achatada, e não alongada, nos polos. Dessa forma, não apenas a teoria newtoniana da gravitação recebia um importante reforço experimental, mas também passou-se a se conhecer melhor a geometria do planeta no qual vivemos. A Missão Geodésica ainda resultou em diversos outros avanços, como descrições da cultura e da vida natural na região, e um mapeamento geográfico bastante melhorado em relação aos disponíveis anteriormente. E isso só foi possível devido à ousadia, coragem e determinação de um grupo de cientistas que, longe de suas famílias, explorando regiões pouco conhecidas e colocando-se com frequência em condições de risco, dedicaram uma fração significativa das próprias vidas para levantar parte do véu que encobre os mistérios da natureza e permitir que, hoje, conheçamos melhor mundo em que vivemos •

Sandro Barboza Rembold
Univ. Federal de Santa Maria
sandro.rembold@ufsm.br



Acima
A Terra é um esferoide levemente achatado: seu diâmetro é cerca de 43 km mais curto entre os dois polos do que ao longo do equador. Tal diferença é imperceptível nessa imagem, o que ilustra a grandeza do trabalho realizado pela Missão Geodésica. (Crédito: NASA)

O Raio da Terra

O raio da Terra varia de acordo com o local em que é medido. Os valores médios e extremos dão uma ideia de quanto a forma de nosso planeta se afasta de uma esfera perfeita.

Raio equatorial 6378,1, km
Raio polar 6356,7 km
Raio máximo 6384,4 km, no pico Chimborazo, Equador
Raio mínimo 6352,8 km, no Oceano Ártico

Astronomia do Futuro

Ciência de Dados e Tecnologia da Informação

Cada vez mais as grandes descobertas em Astronomia requerem manipular e analisar gigantescos cubos de dados (*Data Cubes*), o que implica uma nova forma de fazer ciência.

De acordo com alguns importantes cientistas contemporâneos, a ciência no Século XXI está vivenciando uma nova mudança de paradigma. Este novo paradigma sugere que as próximas mais importantes descobertas científicas estão (e estarão cada vez mais) fortemente condicionadas ao uso intensivo de dados (trata-se do quarto paradigma reconhecido pela comunidade científica como *Data-Intensive Scientific Discovery* ou, simplesmente, *Data Science*).

A emergência deste novo paradigma foi anunciada, por volta de 2010, por James Nicholas Gray, cientista da computação laureado com o prêmio Alan Turing, um dos mais importantes da área. A

ideia de *paradigma* indica como o avanço do conhecimento científico evolui ao longo da história. Para entender como chegamos ao quarto paradigma, vamos revisar rapidamente a evolução da Ciência.

Segundo James Gray, o primeiro paradigma apareceu milhares de anos atrás. É a Era do Empirismo, quando a metodologia estava, exclusivamente, baseada na observação de fenômenos, levando cientistas a suposições que eram verificadas experimentalmente para confirmá-las ou não. Neste paradigma, por exemplo, vamos encontrar muitas pessoas inteligentes a soltar objetos das mãos, logo acima do solo, para concluir, após inúmeros experimentos, que tais objetos eram atraídos pela Terra (fosse ela considerada esférica ou não!).

Algumas centenas de anos atrás, surgiu um segundo paradigma relacionado ao advento de teorias capazes de explicar e generalizar observações e experimentos empíricos. Os cientistas estabeleceram leis científicas sob forma matemática: por exemplo, a Lei da Gravitação de Newton para explicar a queda dos objetos atraídos pela Terra.

Há algumas décadas, com o surgimento dos computadores, estabeleceu-se o terceiro paradigma. Ou seja, com o poder da matemática computacional, os cientistas começaram a elaborar e aplicar simulações numéricas para verificar teorias relativas a fenômenos complexos. É o caso, por exemplo, da simulação de N corpos que, na Astronomia, possibilitou o amadurecimento da Cosmologia ao permitir entender, via modelos e simulação, como se formam as grandes estruturas do Universo compostas por superaglomerados de galáxias.

Portanto, três paradigmas se seguiram: ciência empírica, ciência teórica e ciência condicionada à simulação computacional.

Nos últimos anos, os cientistas

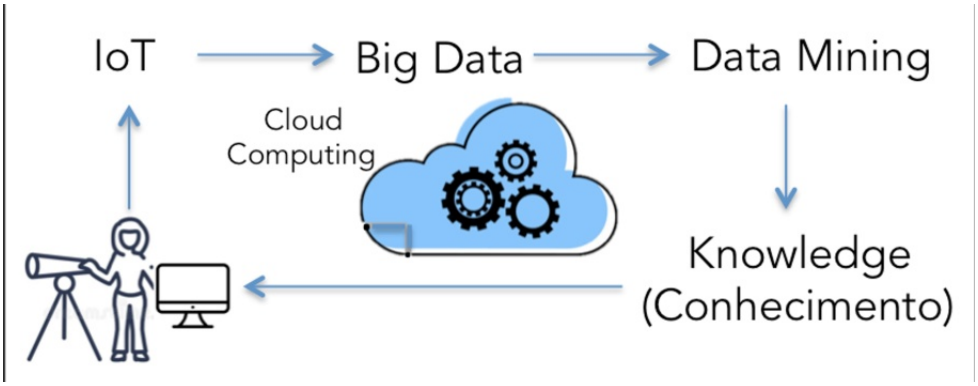
reconheceram a emergência do quarto paradigma devido à explosão na produção e armazenamento de dados conhecido como *Big Data*. No século XXI já foram criados no mundo cerca de 4 ZB de dados digitais (quatro zettabytes = 4×10^{21} bytes). Esse número é extraordinariamente grande pois corresponde à mesma ordem de grandeza da quantidade de estrelas que existe no universo visível. Uma quantidade um pouco menor corresponde à todos os grãos de areia que compõem todas as praias e desertos do nosso planeta. Experimente contar uma quantidade de grãos que caiba na palma da sua mão e você terá a percepção do que é o *Big Data*.

O *Big Data* vem impactando, não só a descoberta de conhecimento científico, mas também, de forma contundente, as decisões de empresas, governos e áreas da saúde, definindo como, quando e por que o usuário interage com o sistema composto por bilhões de dispositivos conectados pela internet. Atualmente, até a indústria cinematográfica se baseia no quarto paradigma para definir um bom roteiro de filme.

A principal fonte de geração de dados digitais com características de *Big Data* forma um conjunto de dispositivos eletrônicos conectados à internet, denominado por Kevin Ashton, em 1999, pelo nome de a "Internet das Coisas" (ou IoT, do termo em inglês, *Internet of Things*).

No contexto da IoT, a busca por informação ou conhecimento novo, seja trabalhando com simulações, sensores de medição ou dados já publicados, se baseia em grandes quantidades de dados que são, para o cérebro humano, muito difíceis de armazenar, manipular, analisar e compreender. É nesse contexto que a aprendizagem de máquina (conhecida como *Machine Learning*) é uma das engrenagens fundamentais no processo de extração de informação a partir do *Big Data*.

A aprendizagem de máquina, no contexto do quarto paradigma, consiste no treinamento de um computador para reconhecimento de padrões seguindo os princípios da estatística computacional e da inteligência artificial. Na prática, refere-se a examinar dados que já foram coletados — utilizando diversos tipos de algoritmos, normalmente de forma automática, — a fim de gerar novas informa-



Abaixo
Diagrama conceitual, mostrando as diversas relações entre os processos do quarto paradigma da ciência. Os equipamentos e instrumentação (Internet das Coisas, IoT) fornecem o grande volume de dados (*Big Data*), que deve ser analisado na nuvem (*Cloud Computing*) por técnicas de mineração de dados (*Data Mining*), de modo a gerar novos conhecimentos.

ções e encontrar padrões. No campo da análise de *Big Data* é chamada de Mineração de Dados (do termo em inglês, *Data Mining*).

O debate sobre o advento de um quarto paradigma, como impulsionado por James Gray, permanece aberto. Na evolução das metodologias para busca de conhecimento científico, trata-se de um método complementar às abordagens tradicionais, ainda obviamente necessárias, indispensável devido à emergência do *Big Data*. De qualquer forma, a ciência do século XXI estará cada vez mais focada na mineração de dados que, por sua qualidade e crescimento exponencial, condicionam — como nunca antes — o processo que possibilita o avanço do conhecimento científico.

A astronomia contemporânea é por excelência uma ciência de *Big Data*. Assim sendo, na astronomia no século XXI — que estará cada vez mais baseada nos conceitos de IoT, *Big Data* e *Data Mining* — todo astrônomo será (ou dependerá diretamente) de um cientista de dados para fazer descobertas científicas importantes. Esse cenário de causa e efeito está atrelado, cada vez mais, à tecnologia da informação com destaque para aquelas chamadas de computação em nuvem (*Cloud Computing*).

Observatórios astronômicos geram uma quantidade impressionante de dados. Por exemplo, o Telescópio Espacial Hubble, em operação desde 1990, fez mais de 1,3 milhão de observações transmitindo cerca de 20 GB de dados brutos toda semana, o que é notável para um telescópio inédito projetado na década de setenta. O ALMA (Atacama Large Millimeter Array), em funcionamento no Chile, adiciona cerca de 2 TB de dados a seus arquivos todos os dias.

Geralmente, cada geração de observatórios é pelo menos dez vezes mais sensível que a anterior, seja por causa da melhoria da tecnologia ou porque a missão é simplesmente maior. Dependendo do tempo de duração de uma nova missão, ela pode detectar centenas de vezes mais fontes astronômicas do que as missões anteriores no mesmo comprimento de onda. Nesse sentido, o equivalente a um diluvio de dados está prestes a ocorrer.

O LSST (Grande Telescópio de Pesquisa Sinóptica), um telescópio óptico atualmente em cons-

Para saber mais

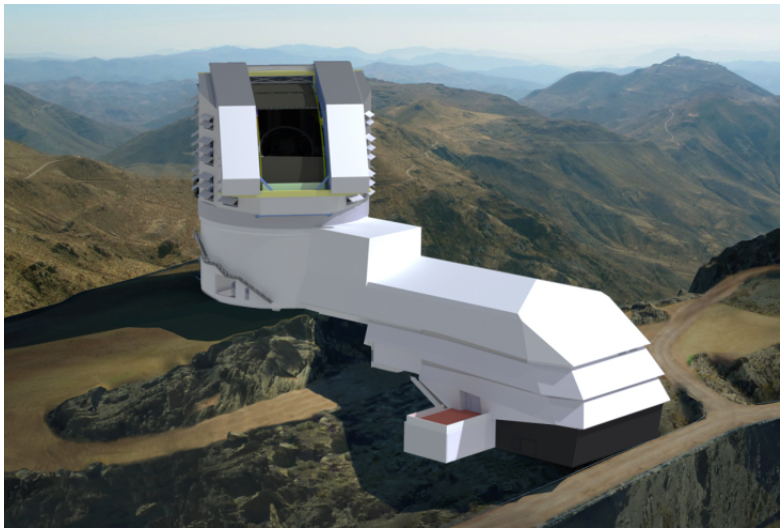
• O quarto paradigma, descobertas científicas na era da e-science; T. Hey , S. Tansley & K. Tolle (2011), Oficina de Textos

• Statistics, Data Mining, and Machine Learning in Astronomy; Z. Ivezic, et al. (2019), Princeton Univ. Press

• Bayesian Models for Astrophysical Data; J. M. Hilbe, R. S. de Souza & E. O. Ishida (2017), Cambridge Univ. Press

• Astronomy in the Big Data Era; Zhang, Y. and Zhao, Y., 2015, Data Science Journal, 14, p.11

• Internet das Coisas; S.L. Stevan Jr. (2018), Saraiva



Acima
O Grande Telescópio de Varredura Sinóptica (LSST), quando pronto, será capaz de mapear o céu inteiro em poucas noites, permitindo o monitoramento de 35 bilhões de corpos celestes. (Crédito: LSST/NSF/AURA).

trução no Chile, previsto para entrar em operação em 2022, fará imagens do céu inteiro a cada poucas noites. O seu desempenho observacional permitirá realizar o levantamento de mais de 35 bilhões de objetos. Será tão sensível que gerará 10 milhões de alertas por noite em fontes novas ou transitórias, resultando num arquivo com mais de 40 petabytes de dados após uma década de funcionamento. Na janela da radioastronomia, o sistema SKA (Square Kilometer Array), quando operacional em 2027, será o telescópio mais sensível do mundo, capaz de detectar, se existirem, estações de radar a até 50 anos-luz de distância. Em apenas dois anos de atividade, será capaz de produzir cerca de 1 exabyte de dados.

A quantidade de dados úteis gerados a partir de observações astronômicas relacionadas a grandes projetos, pode chegar a mais de 110 petabytes em 2020. Com o início do funcionamento do LSST em 2022, somando a contínua produção de dados das observações em andamento, essa carga poderá ultrapassar em 2025 a marca de 500 petabytes. Até 2030, além do SKA, outros projetos de porte gigantesco, onde alguns contam com a participação direta do Brasil, também serão concluídos e ativados. Após essa data, considerando que um número significativo de novos telescópios espaciais já em operação, a astronomia estará de fato imersa no diluvio de dados que ultrapassará, de forma muito rápida, a marca de 1.1 exabytes de dados úteis. Os dados úteis são aqueles a serem extraídos de forma automática da inundação de dados brutos que, na linguagem técnica, é chamado de *Data Lake*. Os valores de dados úteis podem ser inferidos a partir das estimativas de geração de dados prevista por cada instrumento na condição de plena operacionalidade. Na nova abordagem de *Data Lake* até 25% dos dados brutos do *Big Data* podem ser descartados por diversas razões de pré-processamento, qualidade ou prioridade.

Esses projetos ambiciosos testarão a capacidade dos astrônomos de manipular dados dentro do escopo do quarto paradigma. As imagens serão processadas automaticamente — por isso os dados precisarão ser reduzidos para um tamanho gerenciável ou transformados em um produto acabado. Por razões como esta,

os novos observatórios estão ampliando o poder computacional, exigindo instalações capazes de processar centenas de terabytes por dia. Os arquivos resultantes disponíveis na nuvem conterão 1 milhão de vezes mais informações do aquele que hoje pode ser armazenado no seu disco de backup típico de 1 TB.

O dilúvio de dados fará da astronomia uma ciência mais colaborativa e aberta do que nunca. Graças às soluções de IoT e da computação em nuvem, comunidades robustas de treinamento para analisar dados serão formadas propiciando a participação dos cidadãos na descoberta cientifica. Esta solução, conhecida como ciência cidadã (*citizen-science* ou *e-Science*), já está operacional desde 2009 (são exemplos os projetos *Galaxy Zoo*, para classificação morfológica de galáxias, e o Einstein@home que permite que qualquer pessoa use o tempo ocioso do seu computador para ajudar a procurar ondas gravitacionais colidindo com buracos negros).

A astronomia participativa *online* é um exemplo que incorpora a ciência cidadã ao quarto paradigma, requisitando a ajuda do público na pesquisa científica do século XXI, já condicionada à mineração intensiva de dados na busca do conhecimento.

Descobertas na era do *Big Data* mudam a maneira como a ciência é feita. Os astrônomos estão coletando uma quantidade cada vez maior de dados todos os dias. Portanto, mesmo com a aprendizagem de máquina sofisticada, a ciência cidadã e a computação em nuvem bem estruturada, tudo indica que em alguns casos, levará anos para descobrir todos os sinais ocultos e relevantes enterrados nos arquivos.

A boa notícia é que a tecnologia da informação vem evoluindo de forma espantosa e totalmente em ressonância com a ciência de dados. No LSST, por exemplo, o sistema alertará os astrônomos quase imediatamente quando um evento for detectado para permitir observações rápidas de acompanhamento por outros instrumentos. A notícia não tão boa é que até 10 milhões desses eventos transientes são possíveis a cada noite. Com taxas de detecção automática sempre crescendo, a mineração de dados também deverá ser 100% automatizada. Isto é, dado o enorme fluxo de informações que o LSST fornecerá, em algum momento não será possível que os cientistas analisem diretamente até mesmo uma fração representativa dos dados úteis. Em vez disso, eles dependerão cada vez mais da manipulação hábil de algoritmos para examinar os relacionamentos na totalidade de um conjunto de dados. Nesse contexto, os melhores insights serão obtidos a partir das melhores perguntas a serem formuladas sobre as principais propriedades e relações entre todos esses dados.

Tecnologia da Informação

A quantidade de dados envolvidos força-nos a uma mudança de paradigma ao lidar com arquivos de dados astronômicos. A maneira usual de "baixar" os dados, para que os usuários neles trabalhem, precisa evoluir para uma nova maneira de trabalhar, na qual os usuários podem enviar seu código de processamento para os dados, executá-lo nos serviços de computação e armazenamento fornecidos diretamente pelo centro onde os dados residem. O sistema de informação deverá, portanto, fornecer uma infraestrutura para executar interfaces e software de valor agregado sobre os dados. Dessa forma, a maioria do novos projetos observacionais adotarão protocolos de observatório virtual (VO) já existentes (TAP, ADQL, UWS, VOSpace, SAMP entre outros) para construir a infraestrutura de gerenciamento de arquivos de dados. A adoção da tecnologia VO desde o início também garantirá a interoperabilidade total do arquivo com outros aplicativos e arquivos de dados compatíveis com VO.

O paradigma de Observatório Virtual (VO) concentra seus serviços e soluções nas definições e na criação da infraestrutura geral para trabalhar facilmente com dados astrofísicos distribuídos. Com base nessa infraestrutura de informação múltipla e heterogênea, os dados agora tornam-se mais acessíveis e utilizáveis graças às ferramentas específicas que foram desenvolvidas para *Big Data*. Dentro deste paradigma de computação em nuvem para a astronomia de *Big Data* emergem de mãos dadas a astroinformática e a astroestatística. Um exemplo é a espectroscopia de múltiplos objetos envolvendo milhares de dados para análise através de algoritmos automáticos. Devido a essa quantidade cada vez maior de dados, é muito difícil realizar um estudo profundo de objetos individuais. As abordagens da astroestatística na seleção e na análise de grupos é portanto fundamental para a mineração da informação no ambiente virtual. A astroinformática permite que as soluções de VO fiquem cada vez mais fáceis de usar, mesmo com o crescimento continuo de múltiplos dados.

Esta é uma nova era em que os objetivos científicos impulsionam desenvolvimentos e soluções técnicas. Soluções da astroinformática, motivadas pelas demandas da astroestatística do *Big Data*, deverão facilitar a verificação da qualidade dos dados, selecionando e disponibilizando de forma rápida e precisa os dados úteis para a analise integrada de forma múltipla e recorrente até que o conhecimento novo venha a emergir do fundo do lago.

Big Data & Data Mining

Muitos autores tentam definir *Big Data* a partir das proprieda-

des que todo conjunto de dados pode apresentar: volume, variedade e valor. Considerando a taxa de dados envolvida na sua produção, transmissão, aquisição e manipulação também acrescenta-se um quarto *V*: a velocidade em bytes por unidade de tempo. Dessa forma, *Big Data* são dados com grande volume, alta variedade, com discriminação de valor e altas velocidades. Qualquer tentativa de quantificar cada uma dessas propriedades causará polêmica. Mas por uma questão didática para a astronomia vamos apresentar aqui valores e argumentos quantitativos típicos que servem de referencia:

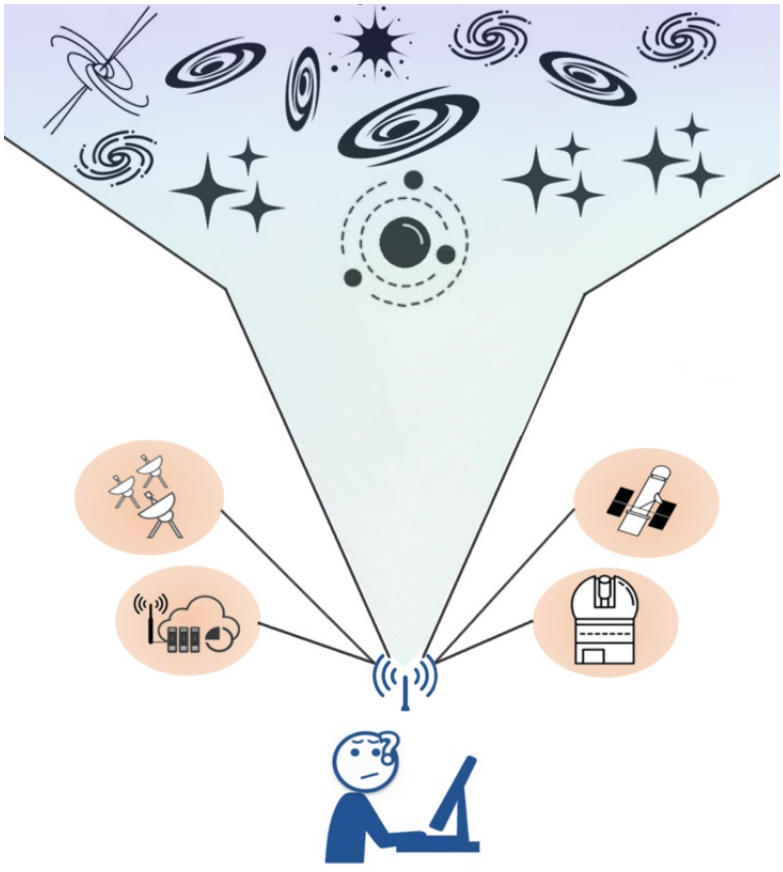
• Volumes superiores a 10 TB;

• Velocidades superiores a 1 TB/h;

• Variedade: essa propriedade pode abranger simplesmente a diversidade de atributos e instancias de um arquivo, bem como a quantidade de arquivos e a sua heterogeneidade (tipo estruturado, não-estruturado ou semiestruturado) e ainda proveniente de múltiplas fontes e apresentados em múltiplos formatos. No caso mais simples, a variedade é apresentada num cubo de dados (*data cube*) contendo centenas ou milhares de instancias em cada dimensão.

• Valor: alguns atributos e instâncias podem ser mais importantes que outros tornando o dado heterogêneo em prioridade. Pode também conter parte do dado com baixa qualidade (descartado como ruído, dispensável por critérios de prioridade ou defeito).

Data mining é a prática de examinar *Big Data* já coletado — utilizando diversos tipos de algoritmos, normalmente de forma automática —, a fim de gerar novas informações, encontrar padrões e agregar soluções e conhecimento ao problema proposto. A mineração de dados é, portanto, a base para uma integração com métodos mais avançados, que envolvem desde as ferramentas mais básicas — como regressões e árvores de decisão — até modelagens mais complexas com elevado nível de otimização de análise, utilizando também métodos de aprendizagem de máquina supervisionados, não-supervi-



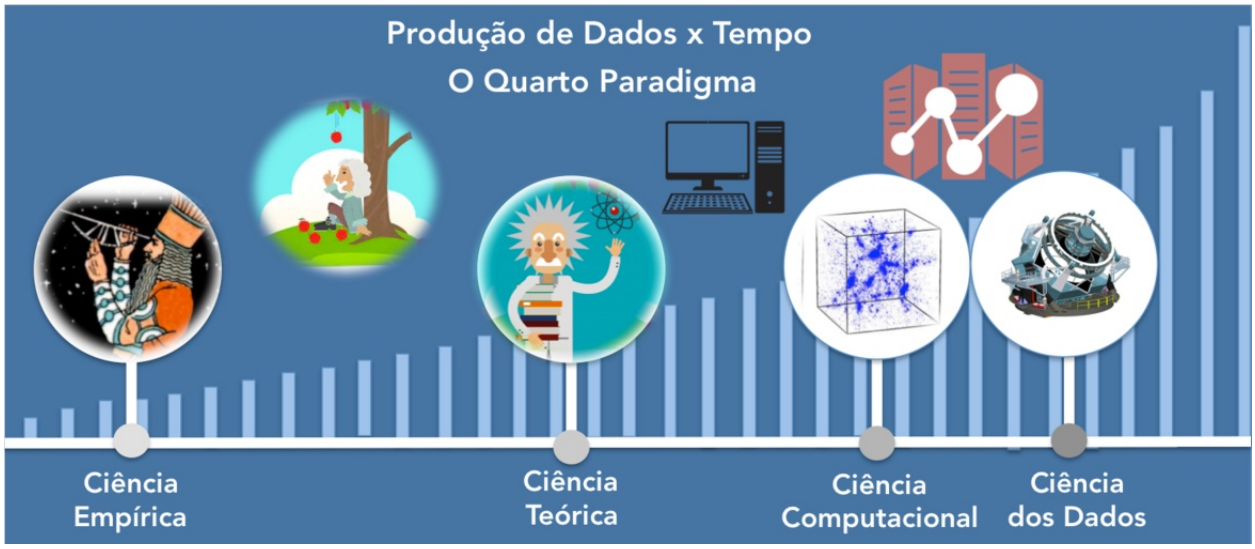
Abaixo
O *Big Data* proveniente das observações astronômicas trará inúmeras questões e conhecimentos novos que só poderão ser abordados pelo cientista de dados que está emergindo na era da IoT.

sionados e híbridos. Inclui também as técnicas de aprendizagem profunda com Redes Neurais (em geral, recorrentes e convulacionais) que são chamadas de *deep learning*. Nestes casos, o propósito costuma ser análises preditivas e prescritivas, que conduzem os indivíduos a tomarem suas decisões de forma mais rápida, automatizada e precisa (ou otimizada).

Uma das primeiras soluções focadas em *data mining*, para fins de exemplificação, foi o software Weka. Criado nos anos 90 e mantido até os dias atuais, Weka é um *toolkit* de algoritmos de *machine learning* e estatística computacional. O propósito do software em sua concepção foi permitir que o usuário não precisasse conhecer linguagens de programação para fazer o pré-processamento dos dados (organizá-los) e assim aplicar diversos algoritmos prontos em seus próprios dados. Dentro do mesmo paradigma também há o *Orange Toolkit*. Para programadores, os recursos de *data mining* são ampliados nos ambientes elaborados para as linguagens Python (scikit) e R. Todas as bibliotecas do Python e R podem ser utilizadas de forma muito prática e produtiva em diversos ambientes de desenvolvimento integrado (IDE) dentre os quais de se destaca o Jupyter. Na astronomia a linguagem R, com destaque para abordagem estatística Bayesiana, é uma referencia. Como exemplo do *Data mining* em Astronomia utilizando o Python destaco aqui o AstroML desenvolvido por Zeljko Ivezic e colaboradores em 2012.

Como um toolkit para mineração e ciência de dados em astronomia, AstroML reúne mais de 100 algoritmos que possibilitam explorar com detalhe dados astronômicos para responder perguntas fundamentais da astrofísica e da cosmologia. Um bom manejo das principais técnicas aplicadas aos melhores dados disponíveis podem (e devem) remeter a pesquisa na direção de encontrar respostas não só para perguntas específicas da astrofísica, como também na direção das principais perguntas da astronomia contemporânea: Qual é a natureza das matéria e energia escuras? Como evoluem as galáxias em seu ambiente? Como a detecção de ondas gravitacionais pode ajudar a explicar a natureza de singularidades cósmicas e a fase de inflação do universo?

Considere essas questões atreladas à idade do universo. Há um século, poderíamos dizer apenas que o universo era muito antigo. Não havia como encontrar um número preciso para essa idade. Agora, graças à análise de mapas detalhados que mostram o eco fraco da radiação cósmica de fundo emitida muito próxima da origem do Universo, sabemos que o este tem 13,82 bilhões de anos, com um desvio de 10 milhões de anos. É fascinante a precisão desse conhecimento.



Acima
As barras representam o crescimento do volume de dados ao longo da história da ciência identificando cada um dos quatro paradigmas.

Daqui a duas décadas já seremos capazes de observar cerca de mais de um milhão de sistemas estelares. Portanto, graças à astronomia do quarto paradigma, ao longo deste novo século, talvez estaremos aptos a responder a mais instigante entre todas as perguntas: estamos sós neste universo? Enquanto isso, nossos telescópios continuarão a observar o universo, com milhões de dispositivos inteligentes e milhares de cientistas de dados, conectados ao redor do mundo, procurando incansavelmente por essas e outras respostas •

Reinaldo Rosa
Inst. Nac. de Pesquisas Espaciais
reinaldo.rosa@inpe.br

As ressonâncias

e o fascinante caso da galáxia NGC 7020

As ressonâncias são responsáveis pelo aparecimento de curiosos e, frequentemente, inusitados fenômenos orbitais. Na Astronomia, elas são encontradas desde escalas subplanetárias até galácticas.

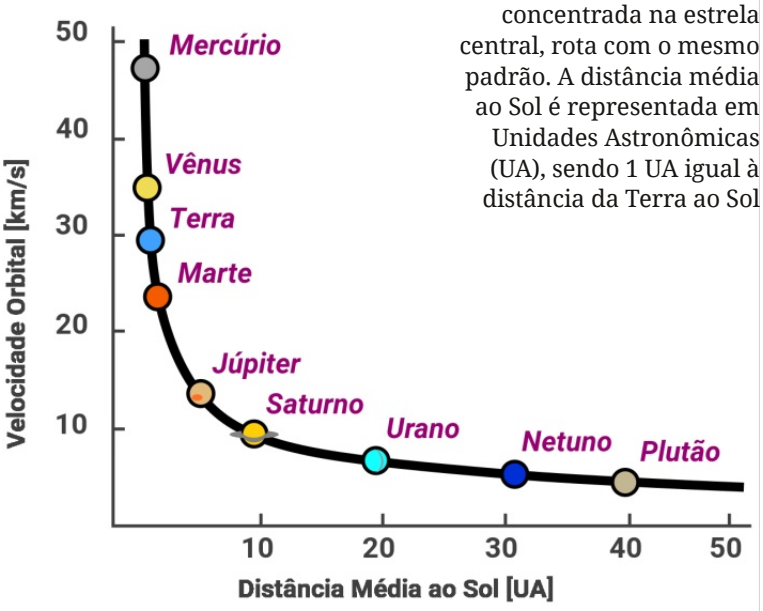
A natureza mostra oscilações e vibrações em todos os níveis e dimensões. As copas das arvores oscilam sob a ação dos ventos. Estruturas que parecem rígidas, como prédios e pontes, têm frequências próprias de oscilação que podem ser ativadas em circunstâncias especiais por ventos ou outras perturbações. Quando isto acontece se diz que o sistema entrou em ressonância.

A **ressonância** é um fenômeno físico que ocorre quando uma força externa, que tem uma frequência regular, interage com a frequência elástica, interna, restitutiva de um objeto para causar uma falha. O exemplo clássico disso é o copo de cristal que se quebra quando o canto atinge sua frequência ressonante. As duas autofrequências interagem e podem causar uma deformação plástica permanente.

Filmes e livros de física de ampla difusão citam o caso da ponte pênsil de Tacoma Narrows, no Estado de Washington, USA, que

colapsou sob persistentes ventos de 65 km/h, que a fizeram oscilar e sofrer torção na sua frequência própria. Presentemente, diversos especialistas sugerem que por ser o vento um fenômeno aleatório, sem nenhum padrão senoidal, tal desastre não pode ser atribuído à ressonância, mas a um fenômeno estudado na oscilação das assas dos aviões chamado de *flutter* aerodinâmico. A ponte Rio-Niterói dá-nos uma ideia desta interação, atingindo sua frequência de ressonância com ventos de 52 km/h, no sentido norte-sul ou sul-norte. Nestas condições, a ponte oscila verticalmente com uma amplitude da ordem de 30 cm.

Em sistemas planetários, a ressonância ocorre quando corpos em órbita exercem influência gravitacional mútua e periódica, estando estes períodos relacionados por uma razão de pequenos números inteiros. Geralmente esse relacionamento ocorre entre pares de objetos. O princípio físico por trás da ressonância orbital é conceitualmente semelhante ao fenômeno descrito acima. No caso gravitacional, um planeta massivo agirá sobre um corpo menor, afastando-o ligeiramente da sua órbita. Quando ambos se distanciam novamente, a força da estrela central tenderá a restituí-lo à posição original, o que produzirá uma oscilação do planeta menor em sua trajetória. Se esta oscilação tem uma frequência semelhante a dos encontros com o planeta massivo o efeito cumulativo dos sucessivos "puxões" agirá no sentido de amplificar a oscilação e tenderá a tirar o planeta menor da sua trajetória. Esse fenômeno aconteceu com os *asteroides troianos*, grande grupo de objetos que dividem a órbita do planeta Júpiter em torno do Sol, agrupando-se a 60° à frente e atrás do planeta. Netuno e Plutão caracterizam um exemplo de ressonância entre planetas, em que o primeiro orbita três vezes em torno do Sol a cada duas voltas de Plutão.



Os satélites dos grandes planetas também apresentam ressonâncias. As luas de Júpiter: Ganimedes, Europa e Io, encontram-se em ressonância orbital 1:2:4.

Um evento curioso que podemos observar, mês a mês, é que a Lua nos oferece sempre a mesma face. Isto acontece porque o

Na página anterior
NGC 7020 no centro duma imagem do Digital Sky Survey 2, com aproximadamente 1 grau quadrado no céu. As duas estrelas brilhantes, à direita, são, HD 201020 e HD 200751 (Crédito: DSS2)

Abaixo
Lei de rotação dos planetas do Sistema solar. Todo sistema cuja massa está majoritariamente concentrada na estrela central, rota com o mesmo padrão. A distância média ao Sol é representada em Unidades Astronômicas (UA), sendo 1 UA igual à distância da Terra ao Sol

Acima
NGC 1300 é um exemplo de galáxia espiral com barra. Barra e braços são a manifestação de uma onda de densidade que circula sobre o disco estelar com velocidade angular constante. No extremo da barra a perturbação tem a mesma velocidade que o disco; na parte interna rota mais devagar e na externa mais rápido que o disco.

seu período orbital coincide com o de rotação em torno do seu eixo, eles estão em ressonância 1:1. Todos os satélites dos grandes planetas apresentam um comportamento semelhante. Esta configuração não é casual, ela foi moldada pela ação da força de maré do planeta sobre o seu satélite por bilhões de anos.

Nos últimos 25 anos têm-se detetado milhares de sistemas planetários extrassolares. Alguns deles apresentam ressonâncias notáveis.

Os 4 planetas do sistema Kepler 223, que orbitam próximos da estrela central, possuem órbitas ressonantes. A cada três órbitas do planeta mais externo, o segundo orbita quatro vezes, o terceiro seis vezes e o mais interno oito vezes. Simulações numéricas desenvolvidas por pesquisadores da Universidade de Chicago e da Universidade de Berkeley mostraram que esta configuração é extremamente estável e os planetas podem ficar confinados por um bilhão de anos ou mais.

Outro caso notável é constituído pelos sete planetas do sistema TRAPPIST-1 que estão confinados na cadeia de ressonâncias mais longa já descoberta, com o período orbital de cada planeta formando proporções simples com os dos seus vizinhos. Para cada 2 órbitas do planeta mais externo, o seguinte orbita 3 vezes, o próximo 4, depois 6, 9 e 15 e o mais próximo da estrela central, 24 vezes.

Os períodos orbitais dos planetas em torno de uma estrela de massa muito maior, crescem com a distância de acordo com a terceira Lei de Kepler. Esta vincula, em proporção direta, o período de rotação P com o raio da órbita D, tal que $P^2 = k\,D^3$.

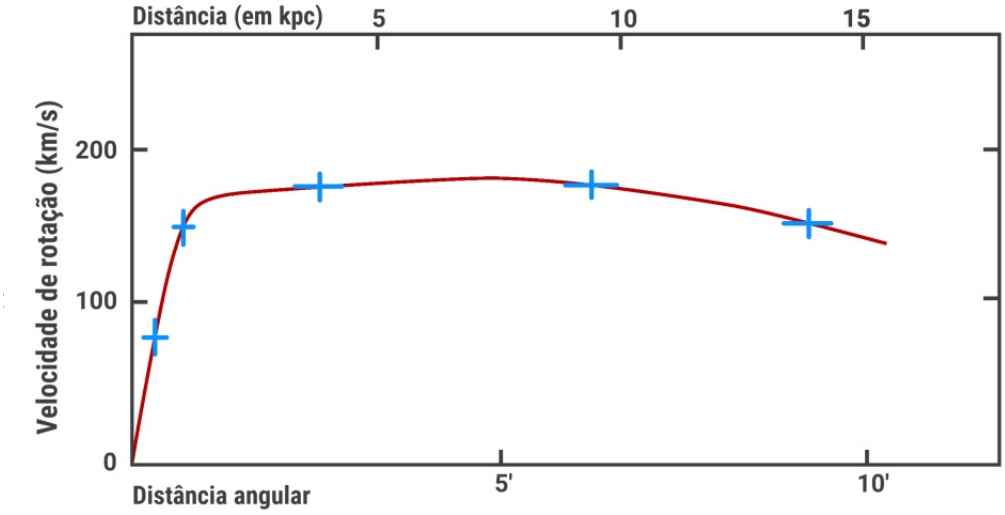
Contrariamente ao comportamento da velocidade dos planetas em torno de uma estrela, a velocidade de rotação das galáxias, gigantescos sistemas com bilhões de estrelas, segue um padrão totalmente distinto. As galáxias espirais possuem um disco de estrelas permeadas por gás e poeira, que roda ao redor do centro da galáxia. Neste disco se destacam estruturas muito brilhantes em forma de braços espirais, que podem apresentar uma subestrutura cen-

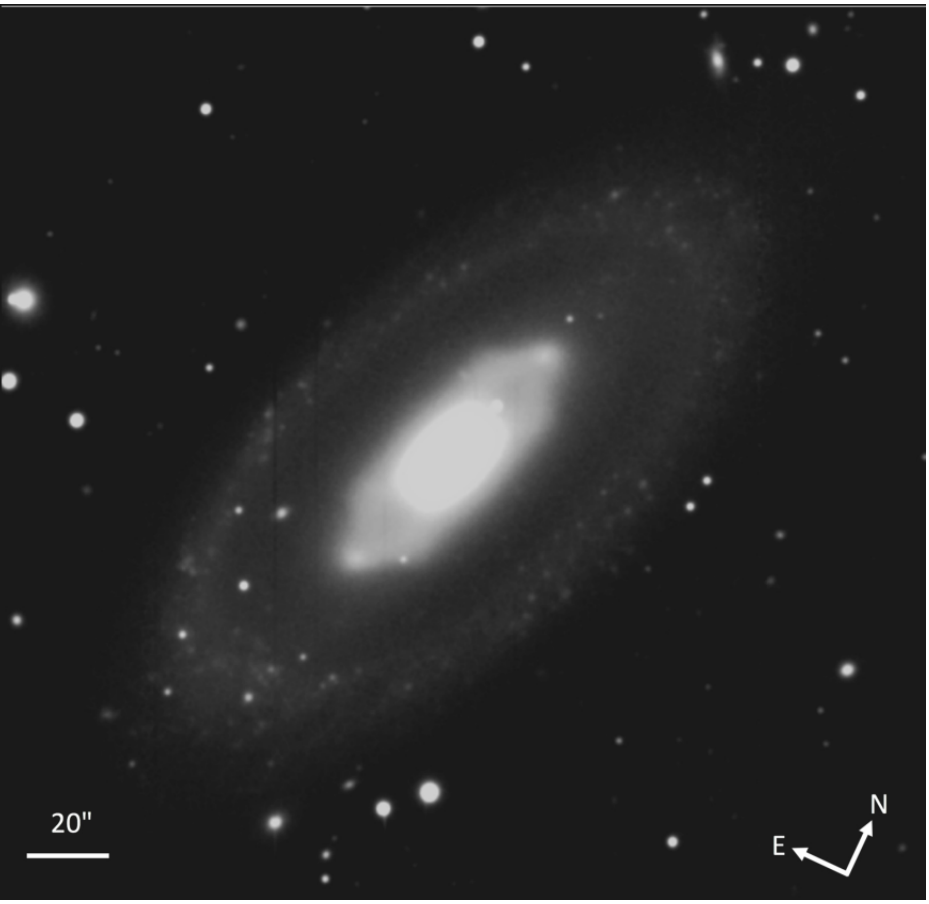
tral em forma de barra com um bojo esférico mais interno. Qualitativamente, à medida que nos afastamos do centro, a velocidade de rotação das galáxias espirais cresce quase linearmente na região mais interna para depois permanecer aproximadamente constante até a periferia do disco. O ângulo percorrido por unidade de tempo, ou velocidade angular Ω, permanece aproximadamente constante na parte central (como a roda de um carro) e cai posteriormente com uma lei inversa à distância. A forma e a intensidade da curva de rotação em função da distância determina as ressonâncias que irão se estabelecer sob a influência de uma particular perturbação.

É geralmente aceito que os braços espirais das galáxias são ondas de densidade. Uma onda de densidade é uma abreviação para descrever como as estrelas de uma galáxia são agrupadas um pouco mais próximas nos braços e se espalham em forma mais tênue entre os braços. Ou seja, são ondas de compressão (como as do som) que viajam através do disco, com velocidade angular Ω_p constante, e causam uma acumulação de estrelas, gás e poeira na sua crista, que leva em geral à formação de novas estrelas. A onda é temporariamente sustentada pela força de sua própria gravidade, mas acaba se absorvendo ou sendo absorvida pelas ressonâncias orbitais, locais onde as oscilações estelares aleatórias têm a mesma frequência da onda ou um múltiplo inteiro dela.

Como a velocidade angular da perturbação é constante e a do disco diminui de dentro para fora, existe um círculo do disco no qual ambas coincidem, isto é, $\Omega = \Omega_p$, Este círculo é chamado de círculo de corrotação. Nas galáxias barradas, o círculo de corrotação está localizado no extremo da

Abaixo
Um exemplo da rotação das galaxias é a curva de rotação da galáxia espiral NGC 4631 (em vermelho), em comparação com os dados observacionais que a vinculam (em azul). Diferentemente dos sistemas planetários, a massa das galáxias não está concentrada. A curva permite calcular a distribuição da matéria no espaço da galáxia. Note que a distância até o centro da galáxia está apresentada em duas escalas: em quiloparsecs (kpc) e em distância angular projetada no céu (em minutos de arco).





Acima
Uma fotografia da galáxia NGC 7020. Distingue-se fortemente a estrutura hexagonal elongada, extraordinariamente simétrica, com dois aglomerados estelares nos extremos, separados por aproximadamente 45 mil anos-luz.

barra.

Como as estrelas no interior do círculo de corrotação rodam com velocidade angular maior que Ω_p, um observador curioso, sentado no extremo da barra, veria estas estrelas circularem no sentido da rotação do disco, porém com a sua velocidade angular diminuída de Ω_p. Contrariamente, veria as estrelas situadas além da corrotação circularem no sentido contrário ao da rotação do disco. No conjunto, o observador veria as estrelas do seu entorno circularem ao seu redor, no sentido contrário ao do disco, com uma frequência denominada epicíclica (f_e). Ela depende da distribuição da massa do disco, da forma e massa da barra e da sua velocidade. As ressonâncias do disco, chamadas ressonâncias de Lindblad, ocorrem nos círculos nos quais f_e é um múltiplo inteiro da diferença $\Omega - \Omega_p$.

A galáxia NGC 7020, objeto do nosso interesse, é única no universo local. Ela apresenta uma estrutura hexagonal alongada central, com duas concentrações de estrelas em vértices opostos, apelidados de alças, perfeitamente simétricas em relação ao centro, com uma separação de 45 mil anos-luz entre elas. Cada uma das alças contém mais estrelas que o grande aglomerado globular Omega Centauri. Esta imensa corrente estelar de milhões de estrelas dança com extraordinária harmonia, em uma órbita hexagonal perfeita que demora entre 500 milhões e um bilhão de anos em ser percorrida.

O disco da NGC 7020 está inclinado em relação ao plano do céu; quando retificamos esta projeção, notamos que a verdadeira forma do hexágono se parece mais com uma figura regular de lados iguais. Diversas explicações para este curioso fenômeno surgiram ao longo das três últimas décadas. Porém, os pesquisadores E. Athanassoula do Observatório de Marselha, P. Patsis de Atenas e Ch. Skokus de Patras na Grécia, mostraram que órbitas hexagonais perfeitamente simétricas podem ser

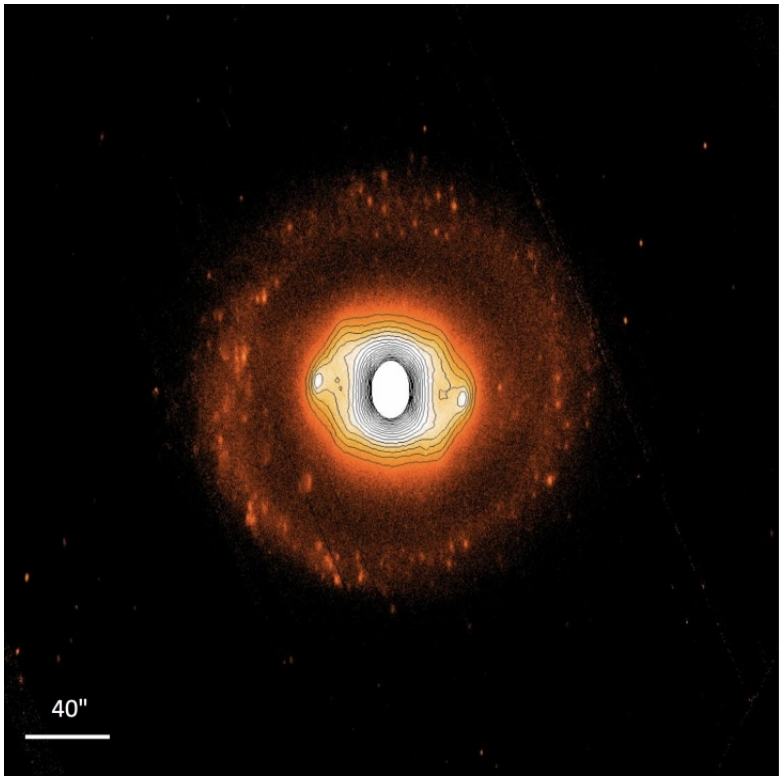
obtidas pela ação de uma barra tridimensional com uma massa igual a ⅛ da massa do disco estelar e um ajuste fino em sua forma e velocidade de rotação. Elas correspondem a uma ressonância 6:1 e, curiosamente, são instáveis. As simulações numéricas foram produzidas com um modelo híbrido, lançando partículas com energias e posições diversas num potencial gravitacional teórico e fixo. Isto significa que o potencial não é alterado pela quantidade de estrelas que se introduzem numa dada órbita, como aconteceria na realidade.

Existe, portanto, uma tensão não resolvida entre o fato de ter uma massa em estrelas tão grande circulando num anel hexagonal instável, por um tempo tão longo.

Finalizamos este pequeno artigo com a seguinte pergunta: Como podem o sutil equilíbro e o extraordinário sincronismo orbital desta gigantesca corrente estelar manter-se inalterado por um período de tempo tão longo? É algo que as futuras gerações de astrônomos buscarão responder •

Horacio Dottori
Univ. Fed. do Rio Grande do Sul
dottori@ufrgs.br

Rubén Díaz
Gemini Observatory
rdiaz@gemini.edu



Acima
Esta imagem em falsa cor, mostra como seria a visão frontal do disco da NGC 7020. As curvas superpostas representam níveis de mesmo brilho, chamados de isofotas. A estrutura quadrada central constitui uma barra fraca, que seria o ente organizador das órbitas hexagonais. O sutil equilíbrio entre distribuição de massa e características da perturbação fazem da NGC 7020 um exemplar único no universo local.

50 anos da ida à Lua

e a participação brasileira no programa LION

No último dia 20 de julho, o mundo celebrou 50 anos da descida do primeiro homem à superfície da Lua. Cerca de 600 milhões de telespectadores puderam assisti-la ao vivo na primeira transmissão internacional por satélite. Passado meio século, a grande maioria dos astrônomos desconhecem que o Brasil desenvolveu intensa atividade em um programa de apoio à missão Apollo.

O Programa LION — "*Lunar International Observers Network*" — do JPL/NASA e Smithsonian Institute, foi criado em 1968, em apoio ao Projeto Apollo, quando a Dr.ª Barbara Middlehurst, da Universidade do Arizona, visitou vários países solicitando colaboração para observações durante o Projeto Apollo dos chamados TLPs, "*Transient Lunar Phenomena*", que aconteciam na superfície do nosso satélite. A justificativa para tais observaçõs era óbvia: os astronautas, quando em solo lunar, não poderiam correr risco de deparar-se com eventuais e inesperados fenômenos, cuja causa sequer tinha à época uma explicação satisfatória. Isso ficou patente quando, em julho de 1968, a NASA publicou o excelente *Chronological Catalog of Reported Lunar Events* da própria Barbara Middlehurst,

Jaylei M. Burley do Goddard Space Flight Center, Patrick Moore do Armagh Planetarium e Barbara L. Welther do Smithsonian Astrophysical Observatory. Através de uma pesquisa histórica em 253 publicações diversas, esses autores identificaram a ocorrência de 579 eventos até 19/10/1967.

Em janeiro de 1968, em visita ao Observatório Nacional do Rio de Janeiro, Barbara Middlehurst solicitou ao Astrônomo-Chefe, Ronaldo R. de Freitas Mourão, a colaboração dos astrônomos brasileiros no Programa LION. Mourão aceitou, assumiu a coordenação e, como primeira iniciativa, convidou os cinco mais experientes astrônomos em observação lunar e planetária: Jean Nicolini, de São Paulo; Rubens de Azevedo, do Ceará; Nelson Travnik, de Minas Gerais; Claudio Pamplona, do Ceará; e José M. Luis da Silva, do Paraná. Após os cinco escolhidos, foram selecionados mais 18 astrônomos profissionais e amadores num total de 23. Todos foram então capacitados para a observação de diversos fenômenos (veja o quadro ao lado).

Aos observadores foram exigidos familiaridade com a observação visual, bons mapas lunares, bibliografia e instrumento com boa resolução óptica. Na ocorrência de algum TLP, procurar-se-ia sendo possível, confirmação de outro observador. Também era exigida a observação em três comprimentos de onda através de filtros seletivos, azul, verde e vermelho da serie Wratten da Kodak encontráveis no mercado e montados no que se chamou *Moon Blinck* cuja confecção era bastante simples. Quando os astronautas estavam próximos uma alunissagem, as observações requeriam prioridade, e tínhamos uma autorização da *Western Union International, Inc.* para o envio de telegrama e cabograma diretamente para o Smithsonian Observatory.

Participação Brasileira

O Programa LION teve início no Brasil com duas importantes observações para a Missão Apollo 8, cinco para a Missão Apollo 10, trinta e quatro para a Apollo 11, dezesseis para a Apollo 12 e seis para a Apollo 13. A maioria dos

Na página anterior
Neil Armstrong caminha sobre a superfície da Lua, durante a missão Apollo 11 (Crédito: NASA).

Eventos lunares observados pelos membros do Programa LION

Blink
Súbito brilho em um acidente lunar, como um flash fotográfico

Bright
Brilho anormal do acidente lunar

Dimming
Obscurecimento sensível de uma região do disco lunar

Pulsation
Aparente pulsação luminosa no disco lunar

Spectrum
Raias espectrais que indicassem escapamento de gases através do espectroscópio ou mesmo visualmente através de filtros seletivos.

Acima
Imagem da Lua, com destaque para os três sítios onde ocorreram os principais eventos lunares observados pelos brasileiros membros do Programa LION.

registros concentrou-se em acidentes que apresentaram brilho anormal, sugerindo a presença de materiais luminescentes ou fosforescentes. As normas estabelecidas no Programa LION era que as observações dos acidentes selecionados contivessem um relato minucioso da observação. No caso de nada ser constatado, era preciso relatar como *observação negativa*. Se confirmássemos a ocorrência de algum TLP, a observação seria relatada como positiva. O modelo dos gabaritos de observação fornecidos pela NASA eram preenchidos e a ela enviados. Todas as observações brasileiras de TLPs como de outros países foram publicadas pelo Smithsonian Institution Center for Short-lived Phenomena. O exame dessas publicações mostrou que na participação de 13 países, o Brasil ao lado dos Estados Unidos, foi o país com o maior número de observadores e registro de TLP.

Resultados

Ao final do Programa, no dia 18/11/1971, o coordenador, Ronaldo Mourão, enviou oficio ao Observatório Astronômico Flammarion de Matias Barbosa, MG, a mim dirigido, solicitando a elaboração de um levantamento e relatório das três observações mais importantes que tínhamos feito. Juntamente com meu colega Sergio Vianna, empreendemos a difícil tarefa de compilar os resultados

Três principais eventos lunares observados

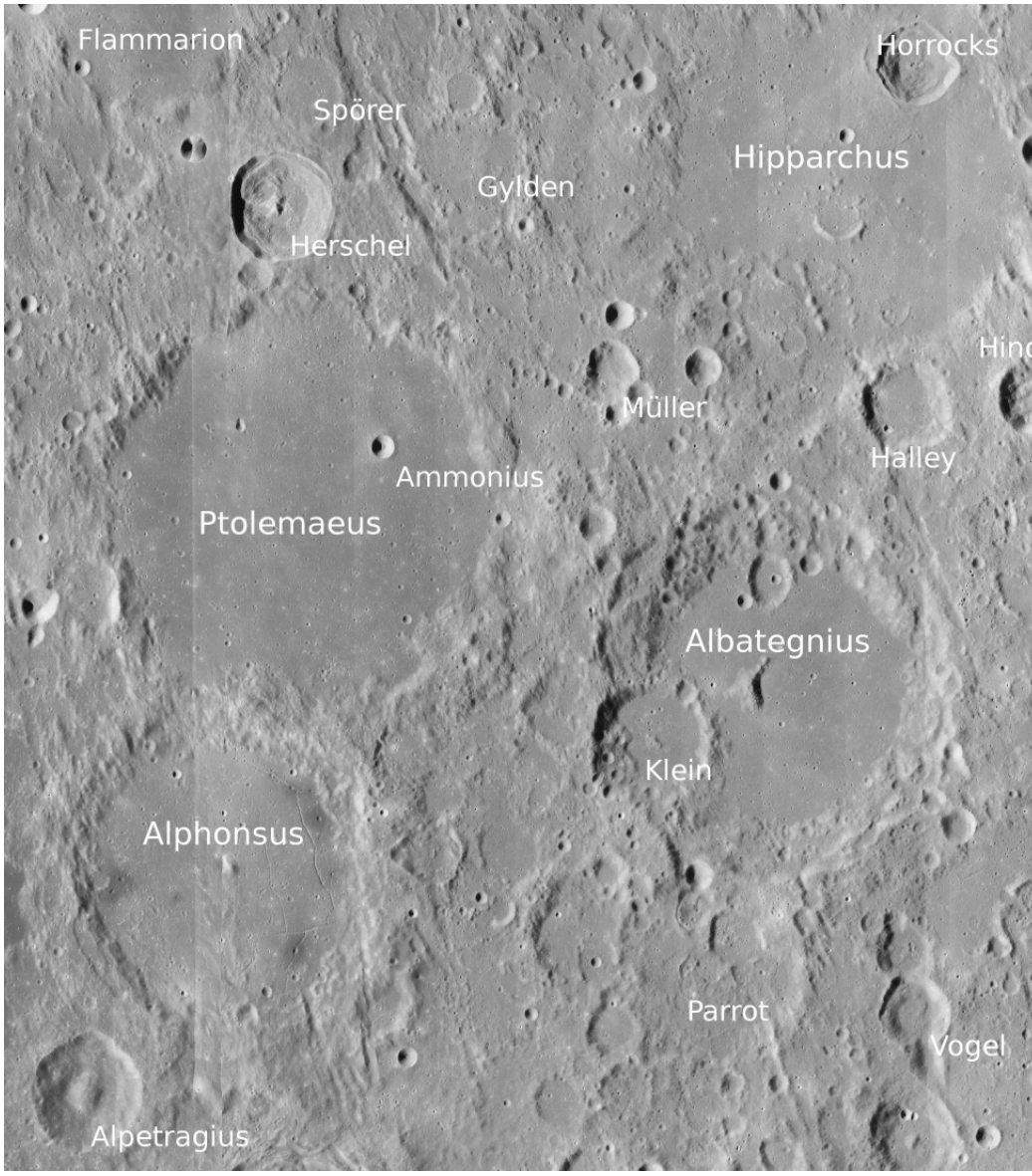
- Obscurecimento na cratera *Peirce* observado por Claudio Pamplona e Jackson Barbosa em 11/04/1970 em Fortaleza (CE)
- Avermelhamento na cratera *Censorinus* observado por Jean Nicolini em 12/04/1970 em São Paulo (SP)
- Bruma luminescente em *Ptolemaeus* observada por Nelson Travnik e Sergio Vianna em 14/04/1970 em Matias Barbosa, MG.É importante apontar que em *Alphonsus*, cratera contígua a *Ptolemaeus*, N. A. Kosyrev e V. I. Ezerski do Observatório de Pulkovo, Rússia, em 2/3 de novembro de 1958 obtiveram um espectrograma mostrando exalação gasosa, comprovando que a Lua guarda ainda resquícios de uma atividade interna.

que foram publicados pela Universidade do Sertão, no convênio FPI, em 1972. Nessa avaliação nos apoiamos no *Chronological Catalog of Reported Lunar Events* já mencionado e no *Quelques Objets Remarquables de la Surface Lunaire* da Société Astronomique de France. As três que consideramos as mais importantes estão apresentadas no quadro da página anterior.

Os eventos lunares nos dias atuais

Passada a euforia da conquista lunar e o encerramento do Programa LION, as observações lunares decresceram bastante. Contudo, nos últimos anos, face o interesse das grandes nações em instalar bases lunares, o monitoramento de nosso satélite foi retomado, especialmente devido ao grande número de impactos de meteoróides que vem sendo registrados. Nos anos 2011 e 2012, somente a NASA flagrou 61 impactos. Astrônomos amadores utilizando longas filmagens com câmeras com sensores CCD, têm conseguido também registrar muitos impactos. Esses registros estão intimamente ligados à segurança das futuras bases e já vem sendo solicitados pelas agências espaciais dos países envolvidos. Recentemente, um clarão enorme de um impacto na Lua sugeriu que o meteoróide poderia ter algo ao redor de 400 quilos; o que seria mais do que suficiente para destruir uma base lunar! •

Nelson Travnik
Observ. Astron. de Piracicaba
nelson-travnik@hotmail.com



Acima
Região da superfície lunar que destaca as crateras Alphonsus, Ptolemaeus e Albategnius. A cratera Alphonsus, além de chamar a atenção por ter uma base bastante fraturada, é famosa por apresentar fenômenos lunares transientes. (Crédito: LRO/NASA).

Exoplanetas
e a busca por novos mundos

Já há séculos a humanidade vem especulando acerca da existência de outros mundos. Atualmente, estamos vivendo a era em que eles enfim começam a ser descobertos!

Planetas que orbitem estrelas distantes, muito além do nosso Sistema Solar, foi por séculos um tema exclusivo de estudos teóricos e de ficção científica. Esses ditos novos mundos deveriam ser relativamente minúsculos quando comparados com suas estrelas-mãe e, por isso, parecia quase impossível que algum método observacional astrofísico pudesse detectar algum outro planeta a anos-luz de distância da Terra. No entanto, nas últimas três décadas, os astrônomos desenvolveram métodos observacionais de muito sucesso na detecção indireta desses outros mundos, também conhecidos como *exoplanetas*.

Um exoplaneta, ou planeta extrassolar, é um planeta localizado fora do Sistema Solar, orbitando uma estrela típica ou uma anã marrom, que é um corpo celeste cujo tamanho está entre o de um planeta gigante, como Júpiter, e o de uma pequena estrela. *Estrelas pequenas* são aquelas não tão grandes o suficiente para

iniciar a fusão do hidrogênio em seu núcleo; por isso mesmo possuem baixa luminosidade, já que a luminosidade cresce quando a massa aumenta. De um modo geral, atualmente dizemos que qualquer objeto que tenha massa da ordem da massa planetária (isto é, menor que algumas dezenas de vezes a massa de Júpiter) e que orbita uma estrela ou uma anã marrom é definido como um exoplaneta.

Uma questão antiga

Embora tenha permanecido por muito tempo sem comprovação, a ideia acerca da existência de outros mundos é uma questão relativamente antiga. Ainda na Antiguidade, Epicuro, em sua *Carta a Heródoto*, declarou sua firme crença em um número infinito de outros mundos, afirmando que:

"Não é apenas o número de átomos, mas também o número de mundos que é infinito no Universo. Existe um número infinito de mundos semelhantes ao nosso e um número infinito de mundos diferentes".

Muito mais tarde, no século XVI, o filósofo italiano Giordano Bruno no seu manuscrito *Sobre o universo infinito e os mundos*, de 1584, inspirado no heliocentrismo copernicano e baseado em um ponto de vista filosófico sem demonstração física, foi o primeiro a afirmar que:

"Portanto, existem incontáveis sóis e um número infinito de mundos orbitando em torno deles, como os sete mundos que orbitam nosso próprio Sol".

A *Gravura Flammarion*, de artista desconhecido, é assim nomeada porque sua primeira aparição documentada foi o livro *L'atmosphère: météorologie populaire* de Camille Flammarion, de 1888. Nessa figura, um jovem viajante coloca a cabeça através da borda do firmamento na intenção de desvendar um universo repleto de novos mundos. Ela foi usada como uma ilustração metafórica das buscas científicas e místicas por conhecimento e, frequentemente, este jovem viajante é associado a Giordano Bruno e seu olhar voltado para mundos distantes.

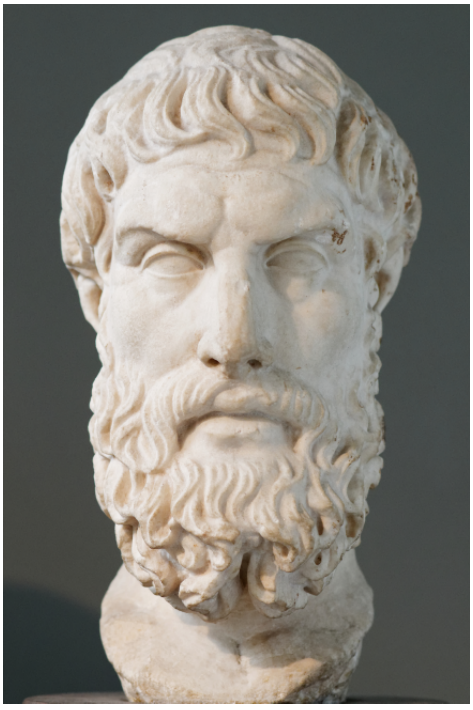
No século XVII, em seu ensaio *Entretiens sur la pluralité des mondes*, o escritor e cientista francês Fontenelle, declarou:

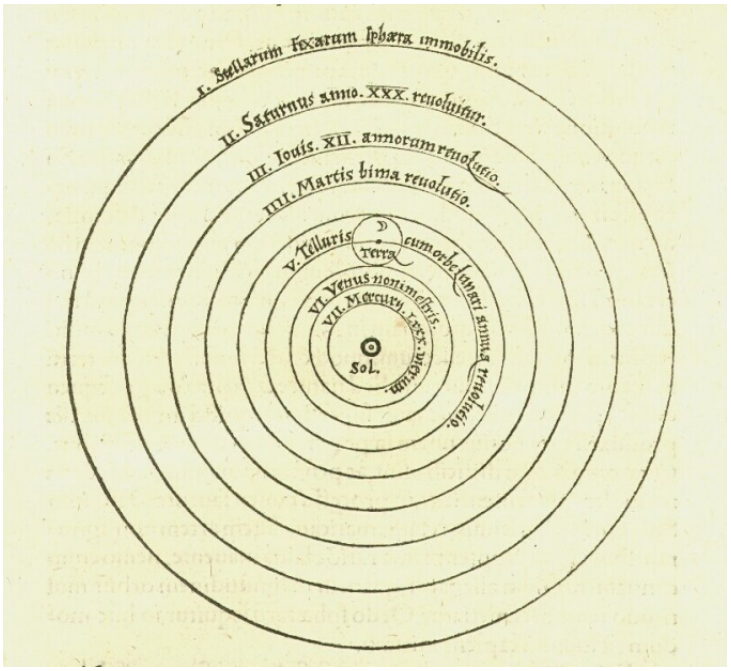
"As estrelas fixas são muitos outros sóis, cada um dos quais ilumina um mundo".

Este livro é a obra mais famosa de Fontenelle, sendo considerada um dos primeiros grandes escritos da era do Iluminismo. Por volta da

Na página anterior
Representação artística de Kepler-62f, uma "superterra" em órbita ao redor de uma estrela menor e mais fria que o sol, situada a 1200 anos-luz da Terra, na direção da constelação da Lira (Crédito: NASA Ames/JPL-Caltech/Tim Pyle).

Abaixo
Busto de Epicuro, filósofo grego que viveu por volta de 342 a 270 a.C.





Acima
Estátua de Giordano Bruno em Roma.

Acima à direita
Representação do modelo heliocêntro no livro *De revolutionibus orbium coelestium*, de Copérnico.

mesma época, instrumentos de observação estavam sendo amplamente desenvolvidos na Europa. Foi quando Huygens, matemático, físico e astrônomo holandês, teve a ideia de observar planetas distantes com tais instrumentos. Sua campanha foi um sucesso e ele descobriu os anéis de Saturno e sua maior lua, Titã, em 1655.

A chegada do século XIX inaugura uma nova disciplina científica que seria hoje denominada de *ciências planetárias*. Esta nova abordagem combinava o desenvolvimento de instrumentação de medição e observação, de forma a levar a ciência da astronomia para fronteiras distantes. Seria largamente aceita neste período a lógica de que uma vez que as estrelas são sóis distantes e o Sol tem planetas, então, provavelmente, as outras estrelas também devem ter planetas. Seria dada a partida a uma corrida científica para a primeira detecção de um planeta ao redor de uma estrela fora do Sistema Solar. Neste período, aconteceram várias reivindicações de deteções de exoplanetas, mas nenhuma foi confirmada. Somente no final do século XX, a precisão em espectroscopia e o progresso da astronomia espacial, juntamente com o processamento de imagens abriram caminho para verdadeiras descobertas confirmadas nesse campo da astronomia.

Em 1992, os astrônomos relataram a detecção de um exoplaneta ao redor de uma estrela morta, o pulsar PSR1257+12, situado a 2000 anos-luz de distância. Três anos depois, a comunidade científica recebia a notícia da detecção do primeiro exoplaneta em órbita de uma estrela do tipo solar. A descoberta fez parte da dis-

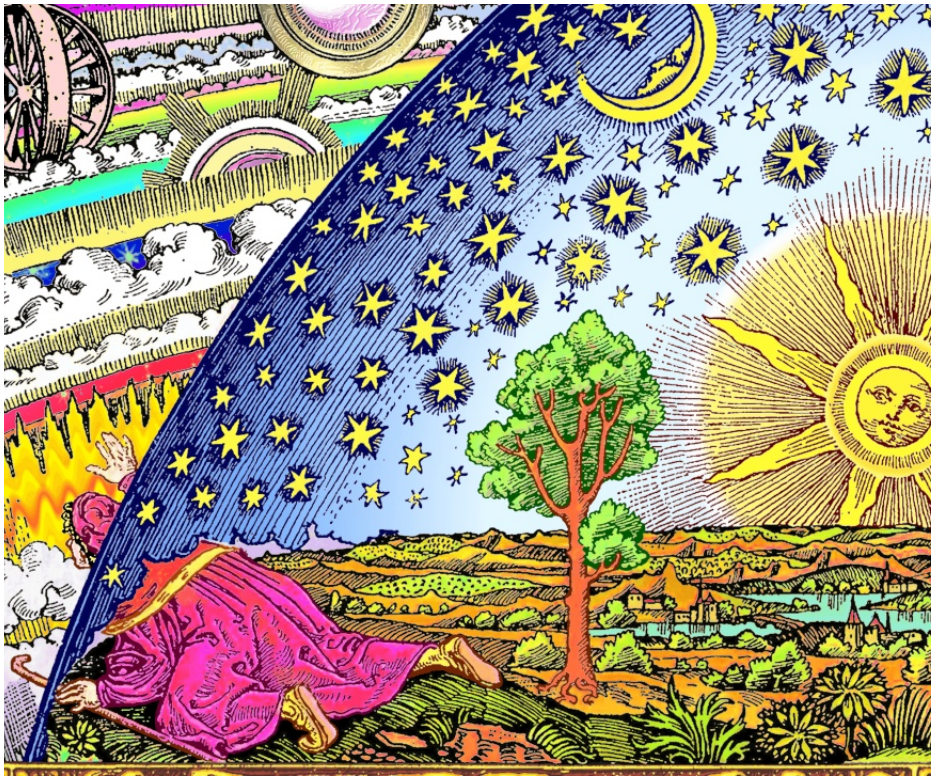
puta entre grupos de astrônomos suíços e americanos. O planeta em questão seria um gigante gasoso semelhante a Júpiter que orbitava sua estrela central com um período orbital bem curto e numa distância menor que a órbita de Mercúrio em relação ao Sol. Esse novo mundo foi detectado em torno da estrela solar 51 Pegasi e situava-se a 50 anos-luz da Terra.

Desde então, a taxa de descoberta de exoplanetas aumentou rapidamente graças ao desenvolvimento de técnicas de detecção em observatórios terrestres e espaciais.

Em setembro de 2019, a contagem de exoplanetas detectados e confirmados é de 4057. Estes, no entanto, não são planetas verdadeiramente semelhantes à Terra em termos de tamanho, temperatura, composição química e água no estado líquido, de forma a abrigar a vida. Nesta corrida científica, ainda nos falta encontrar um análogo real da Terra.

As técnicas para encontrar exoplanetas

A técnica de caça de planetas mais bem-sucedida até hoje tem sido a variação de velocidade radial, também chamada de oscilação Doppler. Os astrônomos que usam esse método procuram por variações nas posições das linhas espectrais no espectro de luz de uma estrela. São verdadeiros "puxões" causados pela força gravitacional dos planetas em órbita em torno de suas estrelas. Quanto mais massa tiver um planeta e menor for o diâmetro de sua órbita, maior o efeito gravitacional sobre a estrela que o abriga. A configuração física desta técnica resultou em que a maioria dos planetas descobertos com esse método são exoplanetas que têm massa grande e estão bem próximos de suas estrelas. Esses planetas são denominados *jupíteres quentes*.

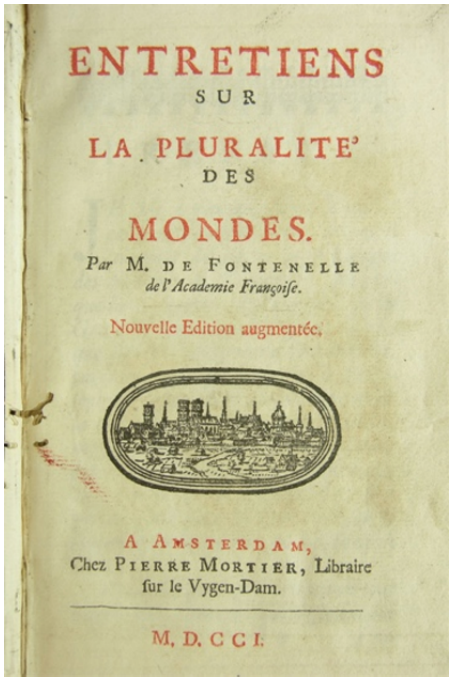


Acima
Gravura Flammarion, de artista desconhecido, reproduzida pela primeira vez no livro *L'atmosphère: météorologie populaire*, de 1888.

Uma outra técnica bem importante é a de microlente. Nesta técnica, uma microlente gravitacional ocorre quando uma estrela passa diretamente à frente de uma estrela de fundo, observada a partir da Terra. O campo gravitacional da estrela em primeiro plano age como uma lente, ampliando a luz da estrela em segundo plano. Se a estrela da "lente" tem um

planeta em sua órbita, essa massa adicional aumenta a ampliação do brilho de maneira reveladora.

O método de trânsito, outra técnica popular, procura pela diminuição periódica no brilho de uma estrela quando um planeta passa em órbita à frente da estrela, eclipsando-a quando vista a partir da Terra. Ao medir o tempo entre dois eclipses, podemos estimar as órbitas e as massas de seus planetas, além da temperatura da superfície.


ENTRETIENS
SUR
LA PLURALITE'
DES
MONDES.
Par M. DE FONTENELLE
de l'Academie Françoise.
Nouvelle Edition augmentée.
A AMSTERDAM,
Chez PIERRE MORTIER, Libraire
sur le Vygen-Dam.
M. D. C C I.

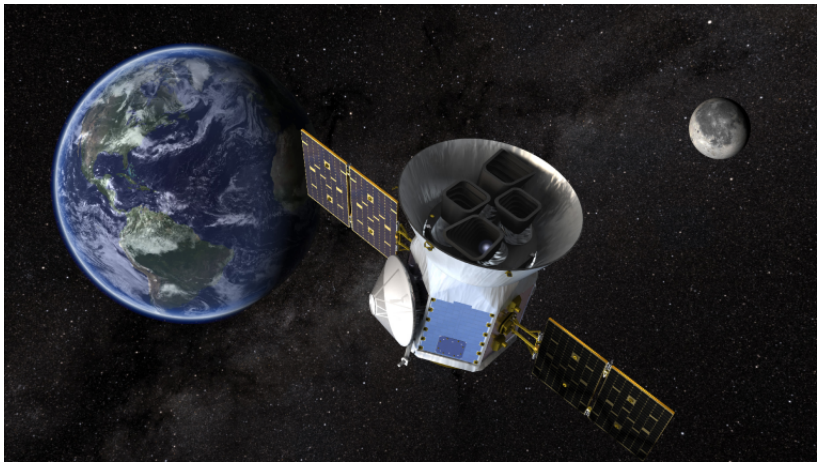
Acima
Primeira página da edição de 1701 do livro de Bernard le Bovier de Fontenelle *Entretiens sur pluralité des mondes*.

Alguns satélites especializados foram construídos para operar esta técnica. Entre 2006 e 2013, o satélite CoRoT observou milhares de estrelas. CoRoT (sigla em francês para Convecção, Rotação e Trânsito) foi uma missão baseada em um telescópio espacial com dois objetivos: procurar por planetas extrassolares com períodos orbitais curtos, particularmente os de tamanho terrestre, e realizar medições sobre oscilações estelares. Essa missão foi liderada pela Agência Espacial Francesa (CNES), em conjunto com a Agência Espacial Europeia (ESA), além de outros parceiros internacionais, entre os quais o Brasil. Em 2009, a missão Kepler da NASA usou o método de trânsito para encontrar exoplanetas. Ela monitorou mais de 150000 estrelas, e foi capaz de detectar mundos do tamanho da Terra em órbita nas zonas habitáveis de estrelas do tipo solar. O sucessor do Kepler foi o satélite TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*).

TESS foi lançado em 18 de abril de 2018 no topo de um foguete Falcon. Este satélite é, também, um telescópio espacial e faz parte do programa *Explorers*, da NASA. Foi projetado para procurar exoplanetas usando o método de trânsito em uma área 400 vezes maior que a coberta pela missão Kepler.

Os principais alvos da missão TESS são as estrelas mais brilhantes, que também são as mais próximas da Terra. TESS é liderado pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT) e conta com financiamento inicial da Google. Seus dados nos permitirão saber mais sobre massa, tamanho, densidade e órbita de um grande número de pequenos planetas, incluindo uma amostra de planetas rochosos nas zonas habitáveis de suas estrelas hospedeiras. Ele também indicará quais são as estrelas mais interessantes para uma posterior caracterização detalhada das atmosferas de seus exoplanetas descobertos, que será realizada pelo Telescópio Espacial James Webb, bem como por outros grandes telescópios terrestres e espaciais do futuro.

Para a próxima década, os europeus preparam a missão PLATO (*PLAnetary Transits and Oscillat-*



Ao lado
Representação artística do telescópio TESS em órbita da Terra (Crédito: NASA).

ions of stars), de cujo consórcio novamente o Brasil fará parte. PLATO será um telescópio espacial da Agência Espacial Europeia com lançamento previsto para 2026. O principal objetivo da missão PLATO é procurar trânsitos planetários em um milhão de estrelas para descobrir e caracterizar seus planetas extrassolares rochosos. A ênfase da missão será os planetas semelhantes à Terra que estejam na zona habitável ao redor da estrela.

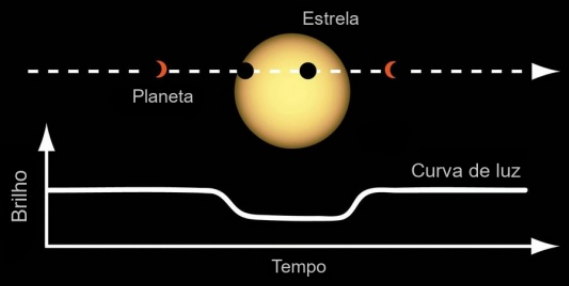
Um objetivo secundário da missão são as medições de oscilações estelares, que permitirá estimar a idade das estrelas e de seus exoplanetas, constituindo-se no verdadeiro diferencial desta missão.

Com base no progresso feito até agora, a comunidade internacional especializada acredita que, nos próximos anos, teremos um catálogo dos primeiros planetas verdadeiramente semelhantes à Terra e isto será resultado da combinação de técnicas de velocidade radial e métodos de trânsito. Será também nesta década, de tantos avanços instrumentais da astrofísica observacional, que os astrônomos contarão com a determinação da composição atmosférica dos exoplanetas do tamanho da Terra. Através dessas etapas possivelmente teremos, enfim, acesso a respostas concretas sobre a procura por sinais indicadores de vida em mundos longínquos •

José Dias do Nascimento
Univ. Fed. do Rio Grande do Norte
jdonascimento@fisica.ufrn.br

Durante a redação deste artigo, recebemos a notícia que o Prêmio Nobel de Física de 2019 foi concedido ao suíços Michel Mayor e Didier Queloz por sua incrível descoberta feita em 1995. Foi a primeira detecção de um planeta ao redor de uma estrela distante semelhante ao nosso Sol — uma façanha na investigação científica moderna. A estrela, chamada 51 Pegasi, fica a 50,45 anos-luz de distância, na direção da constelação do Pégaso. Em 2006, o Prof. Michel Mayor recebeu o titulo de Doutor *Honoris Causa* da UFRN e teve artigos científicos assinados com pesquisadores da UFRN, incluindo este autor.

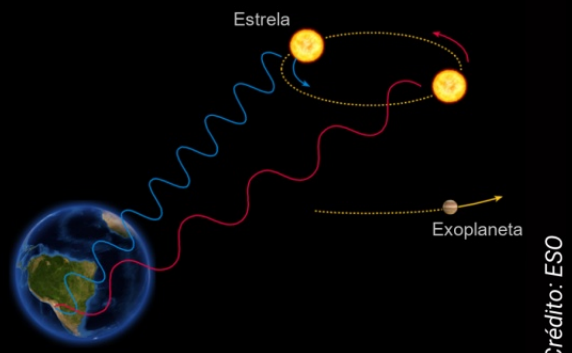
Principais métodos de detecção de exoplanetas



Crédito: NASA Ames

Trânsitos planetários

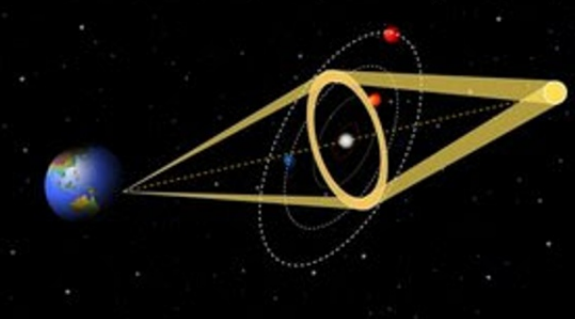
Trânsito planetário refere-se ao método que detecta a variação luminosa causada pela passagem de um planeta quando transita diante da sua estrela hospedeira. É principalmente utilizado pelos telescópio Espaciais, como CoRoT, KEPLER, TESS, etc.



Crédito: ESO

Velocidade radial

Também conhecido como espectroscopia Doppler. Mede-se variações da velocidade que uma estrela se afasta ou se aproxima de nós. Tais variações devem-se ao efeito do exoplaneta sobre a estrela. A velocidade radial pode ser deduzida por pelo efeito Doppler nas linhas espectrais. Este método pode ser usado para confirmar as descobertas feitas pelo método de trânsito. Quando ambos métodos são combinados, a massa do planeta pode ser estimada com boa precisão.



Crédito: NASA/JPL-Caltech / IPAC

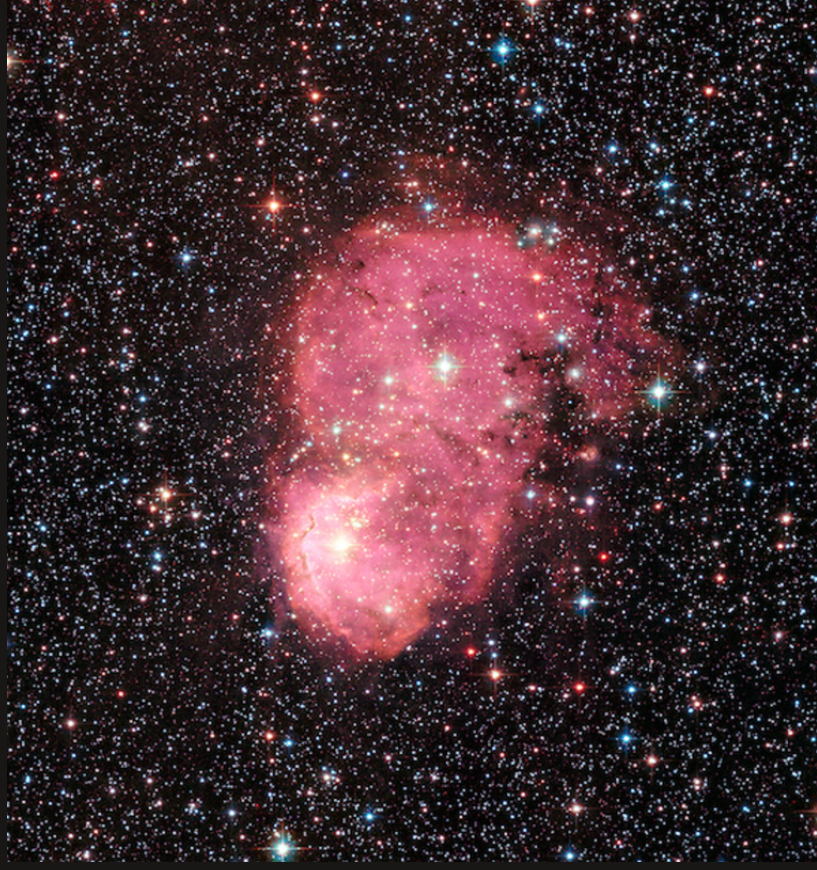
Microlentes

Relaciona-se a um efeito físico que acontece quando os campos gravitacionais de uma estrela com planeta modifica a luz proveniente de uma estrela distante do fundo do céu. Nesta configuração acontece a formação de microlentes gravitacionais. A grande vantagem das microlentes gravitacionais é sua possibilidade de revelar planetas terrestres de baixa massa.

Crédito: NASA/JPL-Caltech/Palomar Obs.

Imageamento direto

Planetas que orbitam longe o suficiente das estrelas podem ser observados através de uma pequena parcela da luz que refletem. Tecnicamente podemos dizer que os planetas são detectados através de sua emissão térmica. Este método fornece pouca informação sobre o sistema e, às vezes, são necessárias observações em vários comprimentos de onda para distinguir o planetas de possíveis anãs marrons.



Acima à esquerda
NGC 2264, a "Nebulosa da Árvore de Natal" (Crédito: ESO).

Acima à direita
NGC 248, a "Nebulosa Papai Noel" (Crédito: NASA, ESA, STScI, K. Sandstrom e SMIDGE team).

Acima
Aglomerado aberto M 44, conhecido desde a antiguidade como o "Presépio" (Crédito: DSS2/ Giuseppe Donatiello).

GALERIA

Alguns objetos astronômicos foram popularmente nomeados com referências natalinas

S.A.B.
Sociedade Astronômica Brasileira